TÉCNICA

Revista de Engenharia

Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento
nº 1/97 Março 97
ISSN 0040-1714 pvp 600.00

Intercidades IC

Da sua cidade para tantas cidades

Rapidez, conforto, preços reduzidos

Caminhos de Ferro Portugueses

índice

Editorial 3

ARTIGO CONVIDADO

Por ocasião do 1.º Centenário da morte de Heinrich Hertz: M. de Abreu Faro 5

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

Controlo e previsão de avarias em motores de avião por EDXRF: F. Alves, P. Rosa Pereira e A. Estêvão Candeias 25

Caracterização de jactos coaxiais turbulentos com e sem recirculação: Isabel S. Carvalho e Manuel V. Heitor 35

Estratégia dos grupos da qualidade na indústria do alojamento turístico na costa de Lisboa: Maria Manuela Sarmento Coelho 49

Baterias de níquel-cádmio portáteis: Tecnologia, Economia Ambiente e Reciclagem: A.M.G. Pacheco, F. Margarido, C.A. Nogueira, P.S.D. Brito, C. Guimarães, F. Delmas 67

Conversão e operação bi-combustível (gasolina ou metano) de motor de explosão: Prof. J.M.C. Mendes Lopes e Eng. J.P. Filipe Torneiro 75

The three generations of lithium-polymer electrolytes for battery application: M.J.C. Plancha, C.M. Rangel, C.A.C. Sequeira and F.D.S. Marquis 89

FICHA TÉCNICA:

TÉCNICA, Revista de Engenharia
Publicação trimestral - p.v.p. 600$00
distribuição gratuita aos sócios da AEIST e aos docentes do IST
ISSN 0040-1714
Depósito legal 85 962/95
Registo de Imprensa 101407

Propriedade
Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, P – 1000 Lisboa, Portugal
Contrib. N.º 501 055 606

Administração, Serviços Comerciais e Assinaturas
Av. Rovisco Pais, P - 1000 Lisboa, Portugal
Telef: 351-1-848 10 18/841 74 10
Fax: 351-1-847 40 14/849 92 47
Correio Electrónico – aeistdoc © eta.ist.utl.pl

Direcção
Director Científico: Manuel Abreu Faro
Director Executivo: Nuno Catarino
Vogal: João Silva
Secretariado e Produção: Paula Carvalho

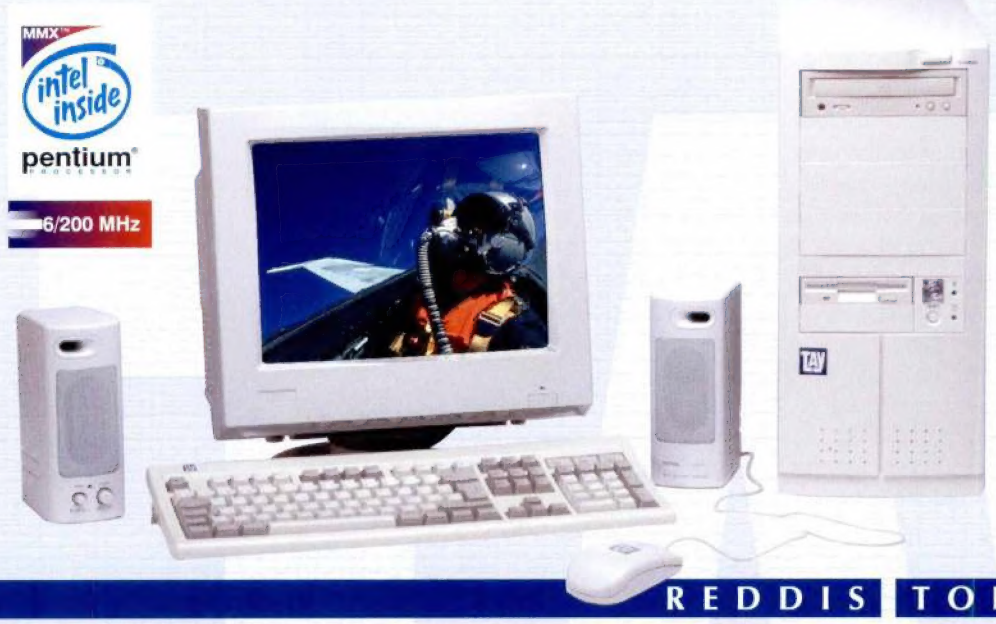
Concepção Gráfica
Traça Design
Praça da Alegria, 6 - 2.º Esq. – 1200 Lisboa
Telef: (01) 343 13 21
Fax: (01) 343 13 24

Publicidade
Dossier Comunicação e Imagens, Lda.
R. Eça de Queirós, 18 – 2.º Lisboa
Telef: (01) 355 92 94/5 – 353 73 21
Fax / Telef: (01) 353 73 16

Execução Gráfica
Gráfica Maiadouro, S.A.
VERMOIM – 4470 Maia
Telef. (02) 948 02 45/948 88 05
Fax: (02) 948 77 07
Delegação em Lisboa
Telef. (01) 796 92 10/795 53 00
Fax: (01) 796 92 79
Tiragem: 5000 ex.

Apoio
Conselho Directivo do Instituto Superior Técnico

Superlógica
Supermercado de Informática



REDDIS TOP STAR

	TAY PENTIUM 150 MULTIMEDIA	TAY PENTIUM MMX 166 MM 1,6 E 2,5 GB		TAY PENTIUM MMX 166 MULTIMEDIA	TAY PENTIUM MMX 200 MULTIMEDIA
DISCO DURO	2,5 Gb	1,6 Gb	2,5 Gb	2,5 Gb	2,5 Gb
PROCESSADOR	Pentium Intel a 150 MHz de velocidade	Pentium Intel c/ tecnologia MMX a 166 MHz de velocidade		Pentium MMX Intel a 166 MHz de velocidade	Pentium MMX Intel a 200 MHz de velocidade
RAM	16 Mb EDO RAM / Video RAM	16 Mb EDO RAM	32 Mb EDO RAM	32 Mb EDO RAM	32 Mb EDO RAM
PLACA BASE	PCI	PCI		Intel Tucson TC 430 HX (ATX), Tecnologia Plug & Play e Flash Bios. Inclui Chipset Triton II	Intel Tucson TC 430 HX (ATX), Tecnologia Plug & Play e Flash Bios. Inclui Chipset Triton II
PLACA DE SOM	16 bits	16 bits		Integrada na placa base Yamaha OPL4	Integrada na placa base Yamaha OPL4
CD ROM	12x	12x		12x	12x
MONITOR	SVGA 0.28, 14" baixa radiação TÜV	SVGA 0.28, 14 " baixa radiação TÜV		SVGA 0.28, 14 " baixa radiação TÜV	SVGA 0.28, 14 " baixa radiação TÜV
CONTROLADORA HD	PCI	PCI		Tecnologia PIIX3 Fast IDE	Tecnologia PIIX3 Fast IDE
CONTROLADORA DE VIDEO	SVGA de 64 bits	SVGA de 64 bits		SVGA 2 Mb Matrox Mystique	SVGA 2 Mb Matrox Mystique
MEMORIA CACHE	256 Kb Pipeline Burst Cache	256 Kb Pipeline Burst Cache		256 Kb Pipeline Burst Cache	256 Kb Pipeline Burst Cache
OUTROS	Floppy Disk 3.5", 1.44 , 2 saidas série alta velocidade (UART 16550) e 1 paralela, caixa minitorre, teclado com funções para Windows'95, rato (compativel Microsoft), colunas de 25 wats.	WFloppy Disk 3.5", 1.44, 2 saidas série alta velocidade (UART 16550) e 1 paralela, caixa minitorre , teclado com funções para Windows'95, rato (compativel Microsoft), colunas de 25 wats.		Floppy Disk 3.5", 1.44 , 2 saidas série alta velocidade (UART/NS 16 CS50) e 1 paralela bidireccional ECP/EPP, caixa semitorre ATX , teclado com funções para Windows'95 (tipo PS/2) , rato (compativel Microsoft), colunas de 25 wats	Floppy Disk 3.5", 1.44, 2 saidas série alta velocidade (UART/NS 16 CS50) e 1 paralela bidireccional ECP/EPP, caixa semitorre ATX , teclado com funções para Windows'95 (tipo PS/2), rato (compativel Microsoft), colunas de 25 wats
	219 900$	264 900$	289 900$	354 900$	394 900$

TODOS OS PREÇOS INCLUEM I.V.A. À TAXA DE 17%

3 anos GARANTIA

Os computadores TAY são equipamentos que dispõem da mais alta tecnologia. Assim, oferecemos-lhe 3 anos de garantia, incluíndo Disco Duro, para que possa tirar o máximo partido do seu TAY. A nossa qualidade é a sua Segurança.

MMX™ Os modelos com processadores MMX incluem Software específico

(1) - específico modelos MMX • (2) - modelos Pentium s/ MMX

Nas Lojas BEEP encontrará a forma de pagamento que mais lhe convém.

informe-se sobre as condições de adesão na loja BEEP mais próxima

A ÚNICA REDE DE LOJAS DE INFORMÁTICA COM MAIS DE 160 LOCAIS DE VENDA NA PENÍNSULA IBÉRICA

BRAGA
Praça Dr. Francisco Araújo Malheiro, 69
4710 BRAGA
Telf. 053 - 61 06 26 • Fax 053 - 61 98 67
(Estrada da Falperra)

PORTO
Rua Fonseca Cardoso, 43
4000 PORTO
Telf. 02 - 31 16 66 • Fax 02 - 31 19 47
(À Rua de Faria Guimarães)

V. N. GAIA
ARRÁBIDA SHOPPING
Loja 70 • Pcta. Henrique Moreira, Afurada
4400 V. N. GAIA
Telf. 02 - 370 54 80 • Fax 02 - 370 54 82

COIMBRA
Rua Carlos Seixas, 158
3030 COIMBRA
Telf. 039 - 70 59 17 • Fax 039 - 70 59 18
(Ao Bairro Norton de Matos)

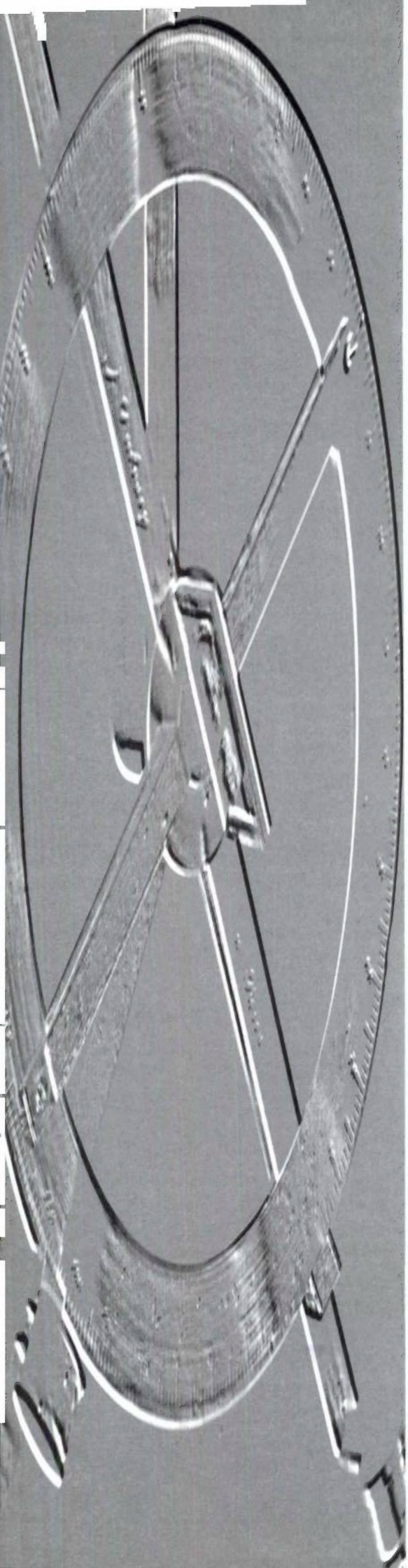
LISBOA
Rua Visconde Seabra, 4A
1700 LISBOA
Telf. 01 - 796 09 64 • Fax 01 - 794 05 05
(Junto à Estação de Entre Campos)

LISBOA
Rua Virgílio Correia, 15-C
1700 LISBOA
Telf. 01 - 727 10 55 • Fax 01 - 727 12 82
(À Estrada da Luz)

CASCAIS
CASCAISHOPPING
Loja 67 • Estr. Nac. nº 9 - Alcabideche
2750 CASCAIS
Telf. 01 - 460 13 31 • Fax 01 - 460 13 11

ALFRAGIDE
R. Quinta do Pinheiro, 12
ALFRAGIDE • 2795 CARNAXIDE
Telf. 01 - 416 96 00 • Fax 01 - 417 50 03
(Junto ao Jumbo de Alfragide)

Os preços e configurações presentes podem sofrer alterações sem aviso prévio. Disponibilização de produtos limitada aos stocks existentes. A informação deste anúncio é válida à data de publicação salvo erro ortográfico e/ou de composição.



EDITORIAL

Escrever bem, sinteticamente,
numa síntese que se alicerça
e nasce de saber profundo e da meditação,
é uma fonte preciosa,
que continuamos a procurar, de Artigos Convidados.
São de importância fundamental
numa Escola,
para a difusão da Ciência e do Pensamento.

Características do instante,
da investigação que decorre
e se anuncia nesse instante,
são as Comunicações Científicas,
que valem pela actualidade
e pelo sinal que dão, do tempo,
da Escola, dos seus Professores e Investigadores.

Vivas, como poderiam ser vivas e incisivas,
seriam as Notícias, as Notas breves,
sobre o que ocorre na Ciência e Tecnologia,
por vezes, e só, em esperança,
em sucedâneo que se prevê e oferece
ou, tão simplesmente, como notícia
do que se conseguiu e onde estamos.

Palavras breves estas,
em que se afirma a nossa atitude editorial,
alicerçada
na convicção de que não há maior virtude
do que a liberdade de publicar
com a subjacente responsabilidade do que
se publica, diz e afirma.

TÉCNICA
Revista de Engenharia
Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento

Aqui poderia estar um anúncio seu.

Para mais informações contacte-nos pelos telefs.: (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef.: (01) 353 73 16
ou escreva-nos para: DOSSIER, comunicação e imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18-2.° – 1000 LISBOA

POR OCASIÃO DO 1.º CENTENÁRIO DA MORTE DE HEINRICH HERTZ

M. de Abreu Faro

RESUMO

Neste trabalho focam-se dois aspectos fundamentais:

- A Óptica e o Electromagnetismo no tempo de Hertz, antecedentes e pensamento científico da época.
- A obra de Hertz e as suas repercussões, com ênfase na descoberta experimental das ondas electromagnéticas previstas por Maxwell e na acção pioneira que Hertz teve na investigação da Electrodinâmica dos Corpos em Movimento.

Evidencia-se, assim, a vida e obra de um físico ilustre que, além do seu trabalho experimental, se revelou também um teórico lógico, consistente e corajoso.

ABSTRACT

- On the present article the focus is on the two following fundamental aspects:
- Optics and Electromagnetism at Hertz time, antecedents and scientific knowledge of the epoch.
- The work of Hertz and its repercussion, with emphasis on the experimental confirmation of the existence of the electromagnetic waves predicted by Maxwell and on Hertz pioneer activity concerning the Eletrodynamics of Moving Bodies.

In this way we pay hommage to the life and work of an illustrious physicist who, in addition to his experimental work, has proved to be a logical, consistent and courageous theorist.

A Academia das Ciências de Lisboa comemorou a passagem do 1.º Centenário da morte de Hertz numa sessão expressamente dedicada a esse facto, tendo sido apresentadas duas comunicações, esta e outra de autoria da Professora Lídia Salgueiro. A segunda parte deste artigo foi publicada na Gazeta de Física, Vol. 18-1995. Dada a generalidade do tema e o interesse que despertou, publica-se o texto integral na Técnica.

1. A ÓPTICA E O ELECTROMAGNETISMO NO TEMPO DE HERTZ

Heinrich Hertz nasceu em 22 de Fevereiro de 1857 e faleceu em 1 de Janeiro de 1894.

Em 1888 confirmou experimentalmente a existência das ondas electromagnéticas teoricamente previstas por Maxwell em 1864 e é por esse facto que Hertz é quase sempre e quase que unicamente referido.

No entanto, em boa verdade, a obra de Hertz não se pode resumir num enunciado assim, tão simples e único.

O espectro das ondas electromagnéticas é extenso e o que desse espectro Hertz revelou, ficou conhecido, designa-se tradicionalmente por ondas Hertzianas e, de facto, é o que mais se salienta na inscrição de Hertz na História da Física e na História dos Homens.

Porquê?

Por duas razões fundamentais:

A confirmação da Teoria de Maxwell.

O aproveitamento de Marconi das Ondas Hertzianas, na concepção e realização de Sistemas de Radiocomunicações.

Aproveitou Hertz da previsão teórica de Maxwell, aproveitou Marconi da realidade forte que adivinhou e conseguiu das ondas electromagnéticas.

Maxwell – Hertz – Marconi, um trio que nos dá flagrante exemplo de que nisto de fazer há que distinguir três estádios, três fases: *to do, to act, to perform.* Reflectir de Shakespeare que emerge do Diálogo dos Coveiros, no Hamlet.

Isto é o que trivialmente se diz e atribui a Hertz mas há mais, no passado e no futuro que motivou.

De Faraday, colheu Hertz a ideia de uma propagação, com velocidade finita, das perturbações electromagnéticas. Faraday tentou conceber uma experiência que o demonstrasse. Raízes, pois, que mergulham mais fundo, no mesmo terreno onde o próprio Maxwell se criou.

Com os trabalhos teóricos, dos últimos anos da vida breve que foi a sua, iniciou Hertz, post-Maxwell, a análise sistemática da Electrodinâmica dos Cor-

pos em Movimento, em que se distinguiu e avultou Lorentz, mas que apenas se esclareceu completamente com Einstein em 1905, no âmbito da Teoria da Relatividade Restrita.

Eis pois Hertz marginado por Faraday e Einstein, qualquer deles contemplativamente tranquilos, desligados de pragmatismos do imediato e da emulação da competição materialista do interesse. Até ao fim dos seus dias tentaram compreender a ordem das coisas: sem ferir, sem agredir, dando a outros para continuar.

Oferece-nos justo referir assim, pois, deste modo, se define na Física a extensão da vida de Hertz, desde a motivação recebida até à motivação transmitida, isto onde profundamente, efectivamente, foi e ocorreu.

A vida e obra de Hertz envolve-se na História da Luz, talvez mais concretamente na Óptica dos Meios em Movimento. Isto muito particularmente no que respeita aos seus trabalhos teóricos de 1890.

Na década de 80 defrontou-se com a Teoria do Campo Electromagnético de Maxwell onde, desde 1864, se sugeria que a luz era um fenómeno electromagnético.

Óptica e Electromagnetismo: convém, para melhor compreensão dos factos, desenhar a traços largos o quadro construído com essas duas disciplinas e onde Hertz se encontrou e actuou.

Descartes, sendo quem foi, acreditava na propagação instantânea da luz. Isto pelos anos de 1634 e explicitamente escrito.

Galileu, esse, pelo contrário, tentou medir a velocidade de propagação da luz. Apenas concluiu e se ficou na convicção de que essa velocidade era extremamente elevada.

Numa distância de uma milha italiana (1,5 Km) defrontava-se com um intervalo de tempo de ida e volta da ordem de 10 microsegundos, era auxiliado por um seu criado. Faz-se notar que Galileu apenas conseguia uma precisão de 1/10 segundo, era manifestamente insuficiente.

No entanto, Galileu, contribuiu, em certa medida, para o que outro, Römer, havia de conseguir.

Da Holanda, chegavam notícias de lunetas, tubos com lentes, portentosas possibilidades.

Em seis meses, Galileu desenhou e construiu uma luneta: afinal, um telescópio por refracção.

Em 7 de Janeiro de 1619, observando *Júpiter,* descobre a existência de quatro "estrelas" próximas. Por observação continuada concluiu tratar-se de quatro "luas", quatro planetas: *Io, Europa, Ganimedes e Calisto.*

Note-se, a título de curiosidade, que em 1979 estavam detectados 16 satélites de *Júpiter.*

Esses quatro, são os que mais se afirmam. São facilmente visíveis, recorrendo a um binóculo 7x50.

Io é o que mais rapidamente se repete, tem um período de revolução de 42 h 28 m 16 s.

Trata-se de um valor médio dos períodos observados ao longo de um período de revolução da *Terra.*

Recorrendo à teoria do efeito Doppler, facilmente se explica que esse valor se deve observar quando a *Terra* estiver, respectivamente, em oposição e conjunção relativamente a *Júpiter.*

Sendo finita a velocidade de propagação da luz, a mesma ocorrência é vista, na oposição e na conjunção, com um atraso correspondente ao trânsito do diâmetro da órbita da *Terra.*

Römer estimou em 22 minutos esse atraso e, atribuindo ao diâmetro da órbita da *Terra* cerca de 283 milhões de Kilómetros, obteve uma velocidade de propagação da luz da ordem de 214300 Km/s.

Este resultado é notabilíssimo, embora se afaste do valor hoje bem determinado e com grande aproximação de 299.792, 458 Km/s.

Isto passava-se em 1676 mas há outras versões.

Parece ser um facto que em 1669 Cassini chega a Paris, de Itália, assumindo as funções de director do observatório astronómico.

Também parece ser um facto que Picard, assistente de Cassini, se desloca a Copenhaga onde se encontra com Erasmus Batholinus que recomenda a Picard o seu jovem assistente Olaus Römer.

Assim e pelo que se disse, Römer chega a Paris em 1672 e associa-se a Cassini e Picard na observação e análise das ocorrências dos eclipses dos satélites de *Júpiter*.

Mais tarde, Römer regressa a Copenhaga onde se torna director do observatório astronómico.

Em 1704 Newton publica a Óptica. Em 1706 Römer fica a saber e anota que Newton, no seu tratado, a Óptica, aceita os atrasos da luz que se revelaram a partir da observação dos eclipses dos satélites de *Júpiter*. Huygens tomou atitude semelhante e no seu tratado sobre a luz, em 1690, descreve pormenorizadamente o método de Römer.

Aceitando assim, tudo leva a crer que Huygens e Newton tenham calculado valores da ordem de 230.000 e 240.000 Km/s, respectivamente, com base nos resultados de Römer.

O desconhecimento era tal, sobre esta matéria, que ninguém distinguiria entre estes valores e outros mais próximos da realidade.

Quanto importa é que a partir do trabalho de Römer a velocidade da luz foi aceite por alguns como finita.

Hooke estava e manteve-se reticente.

Para que o resultado fosse tomado como plausível houve que aguardar um novo resultado, obtido por um outro processo.

Isso ficou-se devendo a Bradley em 1727.

Bradley descobriu o fenómeno da aberração das estrelas que se deve e só à velocidade da *Terra* na sua órbita, cerca de 30 Km/s.

O ângulo de aberração é dado aproximadamente por $\alpha = v/c$ e é independente da estrela de que se trate.

Bradley mediu um ângulo α de aberração da ordem de 20".

Entrando com uma velocidade v da ordem de 30 Km/s, obtém-se para a velocidade da luz um valor de 300.000 Km/s.

Assim terminou a controvérsia sobre a velocidade da luz.

Quando referimos o efeito Doppler, desconhecido que era de Römer, apenas pretendemos com isso abonar os resultados obtidos.

De facto, estando a Terra em conjunção ou oposição, relativamente a *Júpiter*, podemos desprezar o efeito Doppler que tem carácter transversal e é de 2.ª ordem em v/c. Nessas condições, o atraso no eclípse de *Io* coincide muito aproximadamente com o tempo de trânsito da órbita terrestre por um sinal luminoso.

Recorrendo ao efeito Doppler, em posições intermédias, podemos tomar um efeito Doppler puramente longitudinal e o período

observado será, então, $T = T_o\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$.

Por outro lado, o desvio máximo é (T – To) = 15 seg.

Tomando para a velocidade da Terra v = 30 Km/s, obtém-se c = 305.800 Km/s.

É curioso que a aceitação dos resultados de Römer estava dependente de uma confirmação por parte de outros e por outro processo.

Acontece que o efeito Doppler que fundamenta o resultado de Römer e a aberração são fenómenos ligados, uma vez que o vector de propagação e a frequência angular constituem o quadrivector (k, ω/c).

A consistência estava implícita mas a Teoria da Relatividade apenas apareceria em 1905!

A luz punha, no entanto, outros problemas que, se projectaram significativamente nos trabalhos de Hertz.

Quanto à natureza da luz, Hooke admitia que se tratava de vibrações rápidas que se transmitiam instantaneamente num determinado meio, admitia, ainda, que essas vibrações tinham carácter transversal, 1665.

Hooke foi assim um pioneiro, um precursor de uma teoria ondulatória da luz, elaborada por Huygens desde 1678 e anunciada no seu Tratado da Luz de 1690.

Huygens julgava que a luz se propagava no "aether" como o som no ar. Isto apesar de Huygens ter descoberto a polarização da luz.

Newton na sua Óptica de 1704, e de modo mais preciso em 1717, rejeita um éter que, no enunciado de Huygens, exibiria vibrações longitudinais.

Assim e durante um século imperou a teoria de emissão de Newton ou seja uma teoria corpuscular.

Efectivamente, ferida de morte por Newton, a teoria ondulatória apenas se impôs generalizadamente quando, desassombradamente e através de adequado e rigoroso formalismo, foi defendida por Fresnel em 1818.

Respeitando a genialidade de Fresnel, bem se pode dizer que a teoria ondulatória renasceu das cinzas pelas mãos de Young que em 1801 enunciou um princípio de interferência ondulatória que permitia explicar o colorido de películas delgadas.

Muito se deve a Young, mas, para não nos desviarmos do caminho traçado apenas convém referir que Young, crente na teoria ondulatória, explicou no âmbito dessa teoria a aberração da luz que Bradley em 1728 descobrira e calculara com base nas Leis da Mecânica aplicadas à Teoria Corpuscular.

E mais...

Young nestas e noutras investigações conclui haver fortes indícios de que o éter, embora impregnando a substância dos corpos, o faz com pequena ou resistência nula, 1804.

O éter começa assim a configurar-se com um meio fantasmagórico que invade a matéria sem oposição, sem sinal físico desse facto.

Previsões de Arago, relativamente à refracção da luz através de meios refrangentes, conduziram a um resultado nulo.

Experimentalmente, também Arago se preocupou sobre uma eventual distinção no comportamento da luz das estrelas e daquela que se gera na Terra. Intrigado, não encontrou qualquer diferença.

Amigo de Fresnel, buscou junto deste uma explicação teórica.

Estes os motivos, essenciais, que conduziram Fresnel à sua célebre teoria do arrastamento parcial do éter.

A teoria de Fresnel teve grande êxito pois permitia explicar diversos resultados experimentais.

Nomeadamente, os resultados de uma experiência concebida por Boscovich em 1771, adiada e levada a efeito, 100 anos depois, por Airy em Inglaterra, 1871.

Dessa experiência conclui-se que o ângulo de aberração é independente da interposição de qualquer meio refrangente.

Boscovich tinha sugerido que se adquirissem dois telescópios iguais e um deles se enchesse com água.

Segundo a Teoria de Fresnel, a velocidade de propagação das ondas é independente das fontes, esta afirmação destrói a teoria da emissão de corpúsculos de Newton. A velocidade apenas depende do meio.

Ainda e já directamente com o problema de arrastamento, Fresnel admite que o "éter interstelar" que impregna um meio refrangente só é parcialmente arrastado por este quando se põe em movimento em relação a essa imanência que seria o éter interstelar.

No meio refrangente em movimento haverá, agora, um éter arrastado parcialmente e que por esse facto exibe relativamente ao éter interstelar uma velocidade α v em que v é a velocidade relativa do meio refrangente e α o factor de arrastamento de Fresnel

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$$

em que "n" é o índice de refracção do meio refrangente relativamente ao vácuo.

Mas nesse éter arrastado, que é um meio idêntico ao éter interstelar, a luz continua a propagar-se com a velocidade c/n.

Relativamente ao éter interstelar, recorrendo a uma lei clássica de adição de velocidade, a luz exibiria uma velocidade

$$c_e = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$$

Note-se que o vácuo, em que n = 1, não arrasta o éter interstelar o que significa que fica impregnado com éter em repouso em relação ao éter interstelar.

Mas o ar tem um índice de refracção muito próximo da unidade, à superfície da terra e em condições normais, n_{ar} = 1,0003.

Sendo assim, a experiência pode fazer-se num laboratório em que a atmosfera é o ar!

Isso foi feito por Fizeau em 1851 e o meio refrangente era água em movimento.

Recorrendo a métodos interferométricos, Fizeau confirma a previsão de Fresnel.

Pelo que se disse, sendo o índice de refracção do ar praticamente igual a 1, a velocidade c_e coincide com a velocidade da luz relativamente ao laboratório.

É notável que esta lei de composição de velocidades, que é clássica, mas coopera com o conceito de arrastamento parcial, conduza ao que a Teoria da Relatividade de 1905 prevê, numa aproximação de primeira ordem em v/c.

Em 1868, Hoek, recorrendo a métodos interferométricos e à propagação em meios refrangentes, concebe uma experiência em que se evidenciaria o movimento da Terra relativamente ao éter. O que se obteve foi um resultado nulo.

Pode demonstrar-se que é condição necessária e suficiente para que isso tenha sucedido que exista um factor de arrastamento parcial do éter que seja igual a $\alpha = 1 - 1/n^2$.

A Teoria de Fresnel, assim confirmada por Fizeau, consistente com outros factos experimentais, nomeadamente, quantos respeitam a resultados nulos,

mostra claramente que, recorrendo a meios refrangentes e com experiências de primeira ordem em v/c, não é possível, com meios em repouso, evidenciar um "vento do éter".

Mais, a teoria de arrastamento parcial retira ao éter as qualidades tão desejadas de um sistema útil e seguro de referência.

Até 1880 nunca se foi além de experiências de primeira ordem em v/c, recorrendo a meios refrangentes.

Se recorrêssemos a experiências de segunda ordem, as possibilidades de evidenciar o éter renasceriam.

Quem, pela primeira vez, concebeu uma experiência, que permitiria detectar o movimento da *Terra* no éter imóvel do sistema heliocêntrico, foi Maxwell, era uma experiência de segunda ordem em v/c e processava-se no ar. Maxwell propôs uma experiência conceptual em que a diferença dos tempos de percurso de iguais distâncias e de oposta direcção seria revelada por métodos interferométricos.

Exactamente em 1880, Albert Michelson (1852-1931) obteve, da Marinha dos Estados Unidos, permissão para se deslocar à Europa para estudar física teórica e realizar investigação científica no instituto dirigido por Helmholtz.

Aí encontrou um ambiente fervilhante de ideias e meios experimentais únicos no mundo de então.

Inspirado, possivelmente, pela experiência concebida por Maxwell, idealizou e realizou o seu primeiro interferómetro.

O tráfego em Berlim provocava vibrações que incapacitavam o interferómetro, ultrasensível, que Micheson tinha concebido.

Foi Helmholtz, extremamente cuidadoso que era com os seus alunos, que lhe arranjou acomodação adequada no Observatório Astronómico de Potsdam onde, em Abril de 1881, realizou a sua célebre experiência. Foi uma experiência com um resultado nulo. Numa experiência com uma precisão de segunda ordem em v/c o éter continuava a não se revelar.

Em 1887 Michelson, em colaboração com Morley, repetiu a experiência com um interferómetro com dimensões cerca de 10 vezes maiores do que as do interferómetro de Potsdam. Os dois braços do interferómetro mediam, agora, onze metros em vez do metro e vinte da experiência anterior.

Esta realizou-se, em Cleveland e mais uma vez conduziu a um resultado nulo.

No entanto, com a precisão alcançada, ter-se-ia detectado confortavelmente uma diferença dos tempos de percurso de distâncias iguais e ortogonais. Isto na atmosfera de uma *Terra* deslocando-se a 30 Km/s no éter imóvel de um sistema heliocêntrico, como admitia Maxwell.

Assim se chega a 1887 com a forte convicção de que é impossível conceber uma experiência física que permita revelar o movimento da *Terra* relativamente a um éter em que se teima em acreditar.

Lado a lado, subsistiu a Teoria do Arrastamento Parcial de Fresnel, confirmada exerimentalmente por Fizeau.

Esta, a Óptica e o éter que a Óptica postulava para a viabilização da propagação da luz.

A Óptica foi primeiro. Mais tardiamente, o Electromagnetismo construiu-se e acabou por incluir, em si, essa mesma Óptica, que tanto contribuiu para o estabelecimento de ideias e técnicas experimentais de primordial importância.

Diríamos, ainda, que foi na Teoria Electromagnética da Luz, que consta da sua comunicação de 1864, que Maxwell nos lança na pista dessa incorporação e refere as ondas que Hertz, experimentalmente, criou e detectou.

Nos fins do Séc. XVIII a Electricidade e o Magnetismo eram fenómenos disjuntos e ainda não existiam leis quantitativas que os enquadrassem e regessem.

A Lei de Coulomb foi descoberta em 1785 e publicada em 1787.

Coulomb procedeu directamente, medindo forças atractivas e repulsivas entre esferas metálicas carregadas. Recorreu a uma balança de torsão.

No seu formalismo, a Lei de Coulomb é exactamente análoga à lei de atracção das massas de Newton e é a primeira lei quantitativa da Teoria da Electricidade.

No entanto, outros a teriam sugerido e descoberto antes.

Em 1755, Benjamim Franklin surpreendeu-se com o facto de uma bola de cortiça no interior de um vaso metálico electrizado não ser atraída para a parede interior do mesmo.

Franklin visitou a Inglaterra, conheceu Priestely e deu-lhe notícia desse e de outros conhecimentos...

Priestley lembrou-se, então, que Newton demonstrara que no interior de uma camada esférica uniforme, numa terra oca, não existiria qualquer força gravitacional desde que se verificasse a lei do inverso do quadrado da distância.

Isto foi publicado por Priestley em 1767: "The History and Present State of Electricity, with Original Experiments".

John Robison, dois anos mais tarde, realizou o primeiro teste da lei que viria a designar-se de Coulomb. Só em 1801 publicou. Era tarde. Coulomb já se antecedera nessa iniciativa.

Mas há mais, Cavendish, em 1773, retomando a ideia de Priestley, realiza uma experiência notabilíssima, mais precisa do que os métodos de Coulomb e em que demonstra experimentalmente que uma distribuição esférica de carga eléctrica tem acção nula no seu interior.

Maxwell, no tratado de 1873, refere-se e calcula a extrema precisão desta experiência que ele próprio refinou.

Mas Cavendish não publicava ou publicava pouco e foi Maxwell que, 100 anos depois, anunciou os resultados de Cavendish.

A primeira lei quantitativa de Electricidade, generalizável ao Magnetismo, embora não se tenham encontrado até hoje monopolos magnéticos, parecia ser um bom augúrio para as leis de acção a distância, pelo menos, numa atitude de "tudo se passa como".

A pilha de Volta facultou-nos a existência de correntes estacionárias (1800).

Em 21 de Julho de 1820, Oersted publicou o resultado das suas experiências relativas ao efeito do "conflito eléctrico" sobre a agulha magnetizada, designava-se assim, e então, a "corrente eléctrica". A designação de corrente deve-se a Ampère.

A corrente eléctrica interferia na agulha magnética.

Estava descoberto meio Electromagnetismo.

A outra metade descobriu-a Faraday em 1831 ao anunciar a Lei de Indução.

Mas alguma coisa faltava para que a formulação do Electromagnetismo se completasse.

Esse complemento deve-se a Maxwell.

Em 8 de Dezembro de 1864 apresenta as "Equações Gerais do Campo Electromagnético" no âmbito da comunicação que nessa data fez à Royal Society sob o título "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field".

A primeira equação que Maxwell escreveu foi a equação "(A)" "The relation between electric displacement, true conduction, and the total current, compounded of both".

Antes de Maxwel, sabia-se que as faces internas dos pratos metálicos de um condensador eram sede de cargas eléctricas, positivas e negativas, onde nascia e morria o campo eléctrico.

Na concepção de Maxwell, a um campo eléctrico E, variável no tempo, estava associada uma densidade de corrente de deslocamento, $\frac{\partial D}{\partial t}$, em que $D = \varepsilon E$ e ε a constante dieléctrica do meio. A grandeza D designa-se por vector deslocamento eléctrico. Quando se insere um condensador num circuito, nos condutores circula a corrente de condução que se continua no espaço entre os pratos do condensador pela corrente de deslocamento.

Concluindo, a equação (A) numa escrita de hoje e recorrendo aos actuais símbolos, escreve-se:

$$C = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Esta união formal das duas correntes é plenamente consequente: uma corrente de deslocamento provoca os mesmos efeitos que uma corrente de condução, nomeadamente, criará um campo magnético, tal como se observou na corrente de condução com Oersted.

A corrente de deslocamento existe no vácuo!!!

Para esta afirmação espectacular, Maxwell imaginou uma teoria mecanicista do vácuo que para ele era o melhor e mais perfeito dos isolantes.

Encontramo-nos assim com aquilo que se designa por "éter celular de Maxwell".

Na sua memória de 1826, Ampère apresentou a "Teoria matemática dos fenómenos electrodinâmicos, unicamente deduzida da experiência".

É um trabalho notabilíssimo.

Ampère enunciou claramente o seu objectivo no preâmbulo da obra: reduzir as acções electrodinâmicas, e consequentemente o electromagnetismo, a forças entre correntes elementares satisfazendo a uma lei do inverso do quadrado da distância.

Assim se verifica que as teorias newtonianas de acção a distância ainda estavam pujantes e extremamente abrangentes em 1826.

Alguém duvidou que fosse assim, e evidenciou que não era, foi Faraday.

Conceptualmente, nele se radicou o campo electromagnético que progredindo no espaço é o agente que localmente explica os efeitos observados. Faraday rejeitava, não admitia a acção a distância.

De um escrito seu, de 1846, constam reflexões sobre as vibrações do radiamento; a radiação é uma espécie de vibração (transversal) rápida das linhas de força que unem entre si as partículas e por consequência as massas de matéria.

Embora os resultados de Ampère subsistam, a interpretação mais profunda que pretendia, essa, não.

Iniciara-se o declínio da acção a distância.

Faraday foi o grande construtor do novo ideário que Maxwell consubstanciou nas "General Equations of the Electromagnetic Field" que constam da "Part III" da sua comunicação de 1864 e são hoje universalmente conhecidas por "Equações de Maxwell". Contemplando a fenomenologia e leis observadas e estabelecidas por Oersted, Ampère e Faraday, Maxwell introduz, por sua iniciativa, a corrente de deslocamento que para todos os efeitos se adiciona à corrente de condução.

A sua teoria suportou-se em vinte grandezas físicas.

"Entre estas vinte quantidades nós encontramos vinte equações "

"Estas equações são, por conseguinte, suficientes para determinar todas as quantidades que nelas ocorrem, contanto nós conheçamos as condições do problema".

São palavras de Maxwell, em tradução livre, nossa.

Na "Part VI – "Electromagnetic Theory of Light" surgem as ondas electromagnéticas.

No preâmbulo da sua comunicação, refere-se a este capítulo importante, em última análise, essencial, da sua comunicação, salientando que as únicas perturbações que se podem propagar num meio, não condutor, são perturbações transversais à direcção de propagação.

A velocidade de propagação foi obtida teoricamente a partir de dados experimentais como aqueles que, numa experiência concebida por Weber, exprimem o número de unidades electrostáticas de carga eléctrica que se contêm numa unidade electromagnética.

A velocidade determinada é tão próxima da velocidade da luz que parece haver fortes razões para se admitir que a luz é ela própria uma perturbação electromagnética que, sob a forma de "ondas", se propaga segundo as leis electromagnéticas.

A concepção da propagação de perturbações magnéticas transversas, excluindo as longitudinais, foi claramente expressa pelo "Professor Faraday" no seu trabalho de 1846 "Thoughts on Ray Vibrations". Assim se exprimia Maxwell.

A teoria electromagnética da luz proposta por Faraday é a mesma que Maxwell desenvolve nesta sua comunicação de 1864, simplesmente, em 1846, Faraday não tinha dados para calcular essa velocidade de propagação.

Em boa verdade, não dispunha de uma equação de ondas que essa apenas ocorre quando se considera a corrente de deslocamento, pedra angular que fecha esse edifício belo, elegante e eficaz, que é conjunto das Equações de Maxwell.

Na parte VI da sua comunicação, resolve a equação de ondas e conclui que a velocidade de propagação "V" dessas ondas coincide com a relação "v" entre as unidades de carga electrostática e electromagnética determinada pelas experiências de Weber e Kohlrausch.

V = v = 310.740.000 metros por segundo

Estes resultados constam das Leipzig Transactions, Vol. V (1857) e dos Poggendorff's Annalen, Agosto, 1856.

Maxwell refere os resultados obtidos por Fizeau e Foucault para a velocidade da luz.

$V = 298.000.000\ m\ s^{-1}$	Fizeau, Comptes Rendus, 1849
$V = 308.000.000\ m\ s^{-1}$	Foucault, Comptes Rendus, 1862

e, ainda, para melhor conclusão da sua teoria de inclusão da Óptica no Electromagnetismo, estabelece a célebre relação entre "o índice de refracção" e "o carácter electromagnético da substância" que na escrita de hoje se escreve

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon / \mu_o\ \varepsilon_o}$$

Em que μ, ε, μ_o e ε_o são respectivamente as permeabilidade e constante dielétrica da substância em causa e do vácuo.

O repto estava lançado.

Maxwell, no preâmbulo da sua comunicação de 1864, refere-se com respeito e cuidado ao estado actual da ciência do campo electromagnético.

Nomeadamente, salienta as teorias engenhosas de Weber (1849) e Neumann (1858).

A comunicação de Maxwell:

"A Dynamincal Theory of the Electromagnetic Field. By J Clerk Maxwell, F.R.S.", foi recebida em 27 de Outubro e lida em 8 de Dezembro de 1864.

Com a naturalidade dos dias de hoje, consta dos PHILOSOPHYCAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON FOR THE YEAR MDCCCLXV, VOL. 155 que, encadernadas e em volume próprio, se encontram na Biblioteca da Academia das Ciências de Lisboa.

Vasta e diversa foi a obra de Maxwell mas nessa obra avulta o Electromagnetismo.

À comunicação de 1864, mais tarde, seguiu-se, mas nela se radica, o "Treatise on Electricity and Magnetism" publicado em 1873.

Maxwell nasceu em 13 de Junho de 1831 no ano em que, em 24 de Novembro, Faraday anunciou a Lei de Indução.

Maxwell morre em 5 de Novembro de 1879 e, nesse mesmo ano, Helmholtz alertou e pressionou Hertz quando este buscava um tema para a sua dissertação de doutoramento.

O tema proposto, a inspiração provinha das Equações de Maxwell.

2. HEINRICH HERTZ VIDA, OBRA E REPERCUSSÕES

A vida científica de Hertz radica-se na Escola de Berlim, liderada por Helmholtz. Aí se dedicou, na década de 70, especial interesse aos princípios fundamentais da Electrodinâmica.

Confrontavam-se as Teorias do Continente com a Teoria de Maxwell.

Nesse espírito, Helmholtz propôs um prémio no âmbito da Academia Prussiana das Ciências. Que, em última análise, se investigasse experimentalmente a existência de qualquer relação entre forças electromagnéticas e a polarização dielétrica dos materiais isolantes. Por forças, e na linguagem de hoje, entendam-se campos electromagnéticos.

Na Teoria de Maxwell admitia-se, de acordo com a definição de corrente total,

$$C = J + \frac{\partial D}{\partial t},$$

que a variação da polarização produziria os mesmos efeitos que a corrente de condução.

Note-se que $D = \varepsilon E = \varepsilon_0 E + P$, em que P é a polarização.

No vácuo, no éter celular de Maxwell, $D = \varepsilon_0 E$ e ainda aí, nessas circunstâncias, se deveriam produzir efeitos análogos aos da corrente de condução. Esta consequência e generalização foi profundamente sentida e salientada por Hertz no decurso das suas experiências.

Hertz nunca se limitou a uma atitude de um experimentalista puro, perspectivava os resultados das suas experiências através de prévias considerações teóricas, por estimativa do que se esperava, calculando com o que a teoria, de então, permitia.

Assim, quando Helmholtz lhe propôs que no âmbito de um doutoramento concorresse ao prémio da Academia, hesitou.

Era demais, sentiu assim, para uma dissertação de doutoramento que a desejava mais rápida e, em conformidade, incidindo sobre um assunto mais concreto.

As conclusões a que tinha chegado não eram as que desejava ter obtido: recorrendo a oscilações associadas a garrafas de Leyden ou às que se estabeleceriam com bobinas aplicadas a circuitos abertos, não dispunha de meios de medida que lhe permitissem evidenciar qualquer fenómeno nítido.

Declinou o convite, pelo menos, para desde logo e no âmbito da preparação do doutoramento que realizou com uma dissertação sobre a "indução electromagnética em esferas em rotação".

Mas o problema permaneceu, não o enjeitou, nem afastou das suas preocupações.

Durante três anos desempenhou as funções de assistente de Helmholtz (1880-83) e mais tarde e durante dois anos foi Privatdozent na Universidade de Kiel (1883-85).

Em 1886 obteve uma cadeira na Technische Hochschule de Karlsruhe.

Como Hertz mais tarde escreveu, ter-lhe-ia sido impossível passar despercebido qualquer coisa de novo e importante nessas oscilações em que já pensava e se lhe ofereciam insuficientes para investigar o que pretendia.

Assim previa, assim aconteceu.

Estávamos na primavera de 1886.

No gabinete de Física de Karlsruhe encontrou o que então se designava por "espirais de Riess ou Knochenhauer".

Eram duas bobinas planas, enroladas em dupla espiral.

Quando se procedia a uma descarga através do primário observavam-se descargas fortes no secundário, em aberto.

Hertz visava uma experiência pedagógica.

Mas alguma coisa o espantou: a sensibilidade do secundário que não exigia grandes garrafas de Leyden para evidenciar faíscas fortes, nítidas.

Porquê?

A teoria não previa tanto.

Uma explicação seria a de a descarga das garrafas de Leyden provocar oscilações extremamente rápidas.

Isto foi o começo do que então se seguiu.

Guiado por esta convicção, Hertz empenhou-se na obtenção de meios que lhe permitissem estabelecer sistematicamente oscilações de altíssima frequência.

Tratava-se das frequências mais altas, até então conseguidas.

Preocupou-se, ainda, e como era natural e praticamente necessário, em evidenciar, experimentalmente e de modo seguro, a real existência dessas oscilações.

Recorreu Hertz ao fenómeno da ressonância, bem conhecido no domínio do som e em que, Helmohltz trabalhara, concebendo, além de outros ressoadores, o célebre, esférico, que recebeu o seu nome.

Estávamos nos finais de 1886 e os trabalhos prolongaram-se até aos primeiros meses de 1887.

Ruhmkorff tinha inventado a "sua bobina" em 1855 que, em última análise, se baseava nas ideias de Faraday, na lei de indução. Tratava-se de um transformador (sem núcleo de ferro) em que o secundário tinha um número elevado de espiras.

Dispunha-se assim, de uma tensão elevada que era aplicada aos terminais de um "faíscador": duas esferas pequenas e próximas onde, por disrupção, se estabelecia uma faísca.

Se a esses terminais se tivesse ligado as armaduras de um condensador e este, antes do início da disrupção, estivesse carregado, era a energia assim acumulada que conduziria a uma eventual descarga oscilante.

A auto-indução do sistema não estava materializada em nenhuma bobina. É tão simplesmente aquela que está associada indissoluvelmente ao sistema. Em frequências muito elevadas isso basta para sustentar uma oscilação atenuada embora com número apreciável de períodos por segundo.

Se na vizinhança existir uma espira aberta, dispondo também de um faíscador, é possível obter tensões que provoquem uma disrupção e por ressonância obter correntes induzidas elevadas. Agora o que é evidente e ressalta é a espira a que está indissoluvelmente associada uma capacidade equivalente.

Aqui temos na linguagem de hoje o sistema concebido por Hertz e que lhe permitia obter frequências muito elevadas e, com uma sensibilidade insuspeitada, detectar e sustentar, por ressonância, faíscas no detector que se passou a designar por ressoador eléctrico de Hertz.

Nestas experiências, Hertz usou uma bobina de Ruhmkorff de dimensões apreciáveis, comprimento 52 cm e diâmetro 20 cm.

O oscilador de Hertz que se passou a designar por Dipolo Eléctrico de Hertz era constituído por duas esferas metálicas de 30 centímetros de diâmetro (as armaduras do condensador) ligadas por uma haste rectilínea de 2,6 m de comprimento interrompida no centro pelas duas esferas, próximas, do faíscador.

Como detector, Hertz utilizou um ressoador quadrado, de lado 75 cm, interrompido no centro de um dos lados por um faíscador com regulação micrométrica.

Mais tarde, este ressoador tornou a forma de uma espira circular.

Foi com estes dispositivos que Hertz conseguiu produzir e evidenciar, experimentalmente, oscilações amortecidas com uma frequência de oscilação da ordem dos 10^8 Hz.

Numa linguagem corrente da radiotecnia, frequências da ordem da centena do Megahertz.

Estes resultados constam da comunicação de 1887 "Über sehr schnelle elektrische Schwingungen" publicada nos Wiedemanns Annalen, o que em português significa. "Sobre as oscilações eléctricas muito rápidas".

Para melhor observar a faísca do ressoador colocou-o numa caixa. Nessa obscuridade a faísca diminuiu de intensidade.

Hertz concluiu que esse aumento da faísca quando se retirava da caixa era devido à luz emitida pelo faiscador do oscilador. Fundamentalmente e como hoje é bem conhecido à radiação ultravioleta associada.

A luz solar provocava efeitos idênticos.

Estava descoberto o efeito fotoeléctrico:

Uma das heranças que Einstein recebeu de Hertz e soube frutificar.

Assim, estabeleceu a célebre fórmula E=hf que traduz, como se sabe, um processo quântico em que a cada fotão de "frequência" f está associado um quantum de energia hf em que h é a constante de Planck.

Hertz deixou as investigações do efeito fotoeléctrico nas mãos de Hallwachs. Outros, desde logo se interessaram pelo assunto, mas só em 1905 surgiu a interpretação genial de Einstein a qual foi recebida com reserva pela comunidade científica.

Mais tarde, em 1921, foi-lhe atribuído o Prémio Nobel de Física: pelas suas contribuições para a física teórica e, em particular, pela sua descoberta da lei do efeito fotoeléctrico.

Não há uma alusão explicita à Teoria da Relatividade que era ainda objecto de diversas controvérsias.

O efeito fotoeléctrico, entretanto, tinha sido verificado experimentalmente por Millikan em 1916 no domínio do ultravioleta e, mais tarde, em 1920, por Broglie, para os raios X.

Nos tempos de Hertz e seus contemporâneos o efeito fotoeléctrico foi tomado como prova de uma estreita ligação entre o electromagnetismo e a óptica.

Mas voltemos a Hertz e às experiências que o levariam à descoberta experimental das ondas electromagnéticas.

Nas tentativas de explicar certos factos imprevísiveis, Hertz fala, refere-se a ondas ao longo de fios.

Nomeadamente, salientou que pela primeira vez se conseguiu observar a acção entre correntes rectilíneas abertas.

Interrogou-se sobre se este facto permitiria comparar as teorias de Maxwell com as de outros.

Obtida a certeza da produção de oscilações de alta frequência, Hertz, fiel aos objectivos enunciados por Helmholtz, procurou demonstrar experimentalmente que as correntes através de dieléctricos provocavam efeitos magnéticos idênticos àqueles que provocavam as correntes de condução.

Hertz desenvolveu um método engenhoso que permitia, por adequada posição do detector, separar os efeitos eléctricos dos efeitos magnéticos que eram estes que se pretendiam evidenciar.

Foi exactamente nesta fase das suas experiências que Hertz notou e se surpreendeu com o facto de obter acções importantes para distâncias relativamente elevadas do detector. A convicção das anteriores teorias é de que essas acções deveriam atenuar-se mais acentuadamente, de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância.

Os objectivos explicitados pelo tema do prémio da Academia Prussiana tinham sido parcialmente atingidos, experimentalmente demonstrados:

A variação da polarização de um dieléctrico acompanhava-se de campo magnético.

Também se desejava averiguar se as linhas de forças do campo magnético na sua variação no espaço (e no tempo?) provocariam campos eléctricos. Hertz trabalhou nesse sentido.

Mas, para Hertz, começaram a configurar-se aspectos interessantes e que eram originais e genuinamente característicos das teorias de Maxwell.

Um deles era o facto do espaço livre de matéria se comportar como um material dieléctrico:

A corrente de deslocamento no vácuo cria um campo magnético.

Era um facto, mas uma dificuldade subsistia.

Hertz não conseguia demonstrar separadamente que, no ar, campos eléctricos variáveis criassem campos magnéticos e que, também, campos magnéticos variáveis criassem campos eléctricos.

Mas... e, para nós, é o pensamento mais fecundo de Hertz, pressentia que podia demonstrar simultaneamente os dois efeitos se conseguisse provar a existência de ondas electromagnéticas propagando-se no ar com velocidade finita.

Reflexões desta natureza conduziram ao problema da efectiva existência de ondas electromagnéticas propagando-se no ar, o que, isso sim, revelaria e confirmaria o que, na realidade, era novo e essencial na Teoria de Maxwell.

Note-se que naquela época se aceitava e sabia que a "electricidade" leva tempo a propagar-se ao longo de um cabo.

Se o mesmo oscilador excitar ondas num cabo e no ar o padrão de interferência será um e facilmente previsível se as velocidades forem idênticas.

Mas se apenas houver ondas no cabo e no ar se verificasse acção a distância, velocidade infinita, o padrão de interferência seria diferente e facilmente comparável com o outro que se obteria, verificando-se a primeira hipótese.

Este o pensamento fundamental que presidiu às experiências e veja-se como Hertz, investigando, não punha de parte a hipótese da acção a distância.

Foram experiências difíceis. Arrojadas. Não tomaram em consideração plena a influência das circunstâncias em que decorriam e ainda bem. A minúcia, por vezes, destrói a criatividade.

De tudo isto resultou que o objectivo fundamental foi atingido. A partir da análise de padrões de interferência (ondas estacionárias) Hertz provou a existência de ondas electromagnéticas no ar e que a sua velocidade de propagação era finita.

Surge assim a sua comunicação fundamental de 1888 publicada nos Wiedemanns Annalen "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Winkungen" o que em português se poderia traduzir por "Sobre a velocidade finita de propagação de acções electromagnéticas".

Ainda outras experiências e novos resultados: "Über electrodynamische Wellen im Luftraume und derem Reflexion" ou seja "Sobre as ondas electrodinâmicas no ar e sua reflexão".

Não entramos aqui nas vicissitudes destas experiências apenas nos limitamos a referir que tudo estaria certo se não houvesse reflexão das ondas.

Quando mais tarde se repetiu estas experiências e se eliminaram as reflexões, as conclusões de Hertz confirmaram-se e a favor das teorias de Maxwell. No entanto, Hertz, apercebeu-se da possibilidade de reflexão e nessa consciência produziu no laboratório ondas electromagnéticas (dispensou o cabo) e colocou na parede oposta ao oscilador uma lâmina metálica.

Existissem, de facto, ondas electromagnéticas propagando-se no ar e no laboratório, deviam reflectir-se e conduzir a um padrão de interferência típica de ondas estacionárias.

Assim sucedeu e nisso se motivou o segundo artigo de 1888 e que acabamos de referir. "Sobre as ondas electromagnéticas no ar e sua reflexão.

De todas as experiências que realizou, a identificação da luz com um fenómeno electromagnético tornou-se clara e evidente, era o triunfo da teoria de Maxwell: existiam ondas electromagnéticas e propagavam-se com a velocidade da luz, o que era, em última análise, consequência das Equações de Maxwell.

Esta série de trabalhos experimentais culmina com um trabalho teórico notável, diríamos que é o primeiro trabalho teórico sobre uma antena de emissão.

Hertz mostrou, que é possível representar o campo electromagnético em função de um único vector: o vector de Hertz.

A partir desse vector, Hertz determina o campo electromagnético associado ao que hoje se designa por Dipolo Eléctrico de Hertz.

Hertz determinou o campo e traçou as suas linhas de força.

É um trabalho extremamente importante e paradigmático.

Aí se revela claramente a zona próxima onde o campo eléctrico se filia trivialmente nas cargas do dipolo e o campo magnético se filia no vórtice que é a corrente de condução.

Aí se vê claramente, na zona de radiação, um campo electromagnético autónomo: linhas de força do campo eléctrico fechadas, encadeadas com linhas de força do campo magnético, que essas são sempre fechadas.

Neste resultado se consubstancia o mecanismo essencial que preside à propagação das ondas electromagnéticas no vácuo e de que o ar e para este caso é uma boa aproximação.

Tudo isso consta do trabalho "Die Kräfte elektrischer Schwingungen behandelt nach der Maxwell'schen Theorie" ou seja em português "As forças das oscilações eléctricas tratadas de acordo com a Teoria de Maxwell". Por forças, entenda-se o campo eléctrico E e o campo magnético H.

Com este trabalho, Hertz culmina, da melhor maneira, os seus trabalhos sobre ondas electromagnéticas. De facto, aí se contém a implícita aplicação às comunicações o que foi sentido profundamente por Marconi e conduziu a sistemas eficientes e de grande alcance de radiocomunicações. Neste domínio do espectro diz-se, em homenagem a Hertz, que se trata de ondas hertezianas. Sem prejuízo de uma natural extensão a frequências mais baixas e também mais altas, o espectro das ondas hertzianas estende-se, convencionalmente, dos 10 KHz até aos 300 GHz, ou seja, ondas electromagnéticas com um comprimento de onda variando entre 30 Km e 1 mm, respectivamente.

Em 1890 Hertz publicou dois trabalhos teóricos notáveis:

- Über die Grundgleichungen der Electrodynamik für ruhende Körper, Wiedemanns Annalen, 1890, 40, pp. 577-624.
- Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper, Widemanns Annalen, 1890, 41, pp. 369-399.

Ou seja, respectivamente, e em português:

- Sobre as equações fundamentais da Electrodinâmica dos corpos em repouso.
- Sobre as equações fundamentais da Electrodinâmica dos corpos em movimento.

São trabalhos que, recorrendo à simplicidade do essencial, se desenvolvem com uma lógica impecável, decorrente das hipóteses assumidas.

Mais tarde, a escrita das equações de Maxwell assumiu a forma elegante que lhes conferiu Heaviside e Hertz, sucessivamente.

Para Hertz, a Teoria de Maxwell era o conjunto das Equações de Maxwell.

Essas equações traduzem leis experimentais que podem ser testadas.

As cargas eléctricas e as correntes eléctricas são tomadas como símbolos matemáticos e representam, respectivamente, pontos limite de convergência ou divergência das linhas de força do campo eléctrico e eixos de vórtices das linhas de força do campo magnético.

Na exposição de Hertz não se recorre a qualquer hipótese mecanicista.

Hertz entendia e salientava que especulações sobre a natureza da matéria impediam o progresso, eram questões ilegítimas.

Coerentemente, Hertz, não discutiu a natureza da electricidade nem discutia a essência do éter.

Esta atitude havia de conduzir a dificuldades.

Como sabiamente salienta Edmond Bauer, a crise que se motivou com a Teoria de Maxwell, que foi desencadeada por Hertz e se continuou, noutra atitude, com Lorentz, revela que a Ciência, se quiser progredir, e do mundo real nos facultar concepções positivas e consistentes, terá, e quando isso for necessário e convier, passar do ponto de vista do fenomenológico a hipóteses de estrutura e inversamente.

Como nos diz M. Tonnelat, a teoria electromagnética da luz, de Maxwell, nada nos diz nem garante sobre o arrastamento parcial do éter da óptica, teorizado por Fresnel. Como salienta Max Born, Hertz foi o primeiro a utilizar a hipótese da completa convecção do éter pelos dielétricos em movimento e isto no que respeita ao Electromagnetismo.

Adoptou, assim, a hipótese formulada por Stokes para os fenómenos da Óptica.

Hertz estava plenamente consciente da arbitrariedade que cometia.

A teoria de Fresnel e a experiência de Fizeau, e isso sabia-o Hertz, constituiam-se em indicação para que assim não fosse.

A teoria de Hertz revelou fenomenologia nova, qualitativamente era talvez aceitável, quantitativamente não, como ficou demonstrado pelas experiências de Röntgen (1885) e Eichenwald (1903), relativamente ao deslocamento lento de um isolante num campo eléctrico e, bem assim, pelas experiências de Wilson (1904), relativamente ao deslocamento no seio de um campo magnético.

A teoria de Hertz era simples e explicava correctamente os fenómenos de indução em condutores em movimento.

O desacordo surgiu nos resultados experimentais relativamente a dieléctricos em movimento, no seio de um campo eléctrico ou magnético.

Assim, na experiência de Röntgen, o desvio da agulha magnética, reveladora de um campo magnético, tinha-se verificado ser bastante menor do que a teoria de Hertz previa. Isso numa proporção que nos conduz ao factor

$$\frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\varepsilon}=1-\frac{1}{\varepsilon_r}=1-\frac{1}{n^2}=\alpha$$

que é exactamente o factor de arrastamento de Fresnel.

Note-se que ε é a constante dieléctrica do meio em causa e ε_0 a constante dieléctrica do vácuo. De acordo com a teoria de Maxwell, a constante dieléctrica relativa $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ é igual ao quadrado do índice de refracção, n.

Hertz não foi bem sucedido, mas foi ele que desencadeou a crise que se estabeleceu na Electrodinâmica dos Corpos em Movimento.

Desde que se aceitasse a plena identificação da Óptica com o Electromagnetismo, desde que, em consequência, se identificasse o éter da Óptica com o éter do Electromagnetismo, a Electrodinâmica dos Corpos em Movimento teria que passar por duas provas severas: explicar, através das Equações de Maxwell, a experiência de Fizeau e, ainda, o resultado negativo da experiência de Michelson.

Nisso se empenhou Lorentz.

Em 1892 publicou um artigo intitulado "A teoria electromagnética de Maxwell e sua aplicação aos corpos em movimento".

Lorentz aceitava o éter mas distinguia entre esta substância e a matéria: a matéria é tudo quanto possa ser sede de correntes eléctricas e movimentos electromagnéticos. Éter seria tudo quanto não é matéria ponderomotriz.

Nesse artigo, Lorentz preocupou-se com o problema de exprimir as Equações de Maxwell num referencial de inércia que se movesse com velocidade constante e uniforme relativamente ao éter.

Nesse mesmo artigo deduziu o factor de arrastamento de Fresnel embora este resultado não tenha sido a motivação primeira.

Ainda em 1892, num artigo intitulado "O movimento relativo da Terra e do Éter", discutiu as experiências de Michelson e Michelson-Morley e baseado numa lei newtoniana de adição de velocidades enunciou a sua arrojada hipótese de que o resultado nulo se poderia explicar por uma contracção do braço do interferómetro orientado segundo a direcção do movimento.

Este artigo veio à luz em 26 de Novembro de 1892 e a hipótese foi apresentada com independência de igual proposta formulada por Fitzgerald em 1889.

Em 1904, Lorentz publicou a sua versão final da Electrodinâmica dos Corpos em Movimento o que consta do artigo intitulado "Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity less than that of Light".

Aí aparecem, pela primeira vez, formalmente acabadas, as Transformações de Lorentz.

Estas transformações tinham sido obtidas em 1900 por Larmor o que consta do seu livro "Aether Matter".

Mas seriam estas transformações, as de ambos, em conteúdo e significação, as mesmas que foram deduzidas e funcionam na Teoria da Relatividade Restrita?

Não eram.

Virtude maior é a da indiciação de uma covariância das Equações de Maxwell sob essas transformações.

Mas, permanecia o éter, havia uma referência sistemática e obrigatória ao éter.

Quem o dispensou foi Einstein que, a partir dos dois princípios que informam a Teoria de Relatividade Restrita, reduziu a consequências a experiência de Fizeau e as experiências de Michelson e Michelson – Morley.

Assim, e de forma brilhante, terminou a crise que Hertz desencadeou e se estabelecera no seio do Electromagnetismo, mais concretamente, na Electrodinâmica dos Corpos em Movimento.

Agora tudo se explicava. E mais, a Física enriquecia-se com uma nova teoria, universal, fonte de harmonia: a Teoria de Relatividade.

Em 1890 Hertz publicara "Über die Grundgleichungen der Electrodinamik für bewegte Körper". Em 1905, quase sob o mesmo título, Einstein fecha a questão com o seu célebre artigo "Zur Elektrodynamik bewegter Körper".

Aí se continha uma revisão profunda do espaço e tempo que passaram a ficar indissoluvelmente ligados, integrando o quadrivector espaço-tempo.

Para tanto bastou que Einstein postulasse dois princípios:

- O Princípio de Relatividade, restrito a referênciais de inércia.
- A constância da velocidade de propagação de sinais electromagnéticos no vácuo e relativamente a qualquer referencial de inércia.

As transformações que Einstein estabeleceu são idênticas, formalmente, às de Lorentz, mas deixa de haver qualquer referencial previlegiado: são transformações intermutáveis entre referenciais equivalentes. Esta a marca fundamental da Teoria da Relatividade.

Hertz viveria pouco.

Experimentalmente, ainda se interessou e realizou experiências com raios catódicos.

Não conseguiu um vácuo que lhe permitisse evidenciar a deflexão desses raios por um campo eléctrico forte.

Podia ter descoberto os electrões.

Podia ter gerado e observado os raios X.

O seu último trabalho é de natureza teórica "Die Principien der Mechanic, in neuen Zusammengange" ou seja, em português, "Os princípios da Mecânica apresentados numa nova forma".

É uma obra póstuma, prefaciada por Helmholtz, que faleceu no mesmo ano de Hertz.

Hertz faleceu no dia 1 de Janeiro de 1894.

Neste seu último trabalho tentou estabelecer uma formulação da Mecânica em que, além do mais, a acção a distância se explicava por uma rede de massas ocultas que assegurava um processo de acção contígua idêntica à que se observa na teoria do Electromagnetismo.

É uma obra controversa que, no entanto, tem vindo a merecer renovado interesse.

Hertz não deu especial atenção a eventuais aplicações das ondas electromagnéticas.

Hertz foi despertado por Helmholtz no ano da morte de Maxwell, 1879.

Marconi, foi despertado por Righi no ano da morte de Hertz, 1894.

Uma notícia necrológica extensa e descritiva da obra de Hertz, escrita por Righi, surpreendeu Marconi, de férias nos Alpes Italianos. Tinha 20 anos. Nascera em 25 de Abril de 1874.

Volta a casa, à Villa Griffone, perto de Bolonha.

Aí repete Hertz e vai além.

Parte para Inglaterra.

Em 2 de Junho de 1896 requer uma patente para a Telegrafia sem Fios, o que acontecia pela primeira vez no Mundo.

Em Dezembro de 1901 consegue uma ligação radiotelegráfica da Europa para a América.

Em 1924, após intensas pesquisas experimentais a bordo do seu barco Elettra, telefonou, via rádio, de Inglaterra para a Austrália.

As ligações hertzianas directas, por difracção ou via ionosfera, eram uma realidade que marcou profundamente o Século XX.

Na realidade foi uma tríada notável:

Maxwell – Hertz – Marconi.

Foi desta sequência que resultou a fama maior de Hertz.

Mas Hertz não foi só isso.

Corajoso, não se submeteu ao preconceito, à majestade do que já era.

Iluminou as suas experiências com o poder da sua observação e crítica científica.

Não experimentava ao acaso: previa, antevia, desistia, por vezes, perante a indicação de sinais físicos tão fracos que não poderia detectar. Assim e por isso foi declinado em 1879 o convite de Helmholtz.

Buscava e filiava-se nos princípios primeiros, ansiava por uma simplicidade suficiente.

Conseguiu experimentalmente o que Faraday já intuira e tentara. Disso sabia ele.

Confirmou e contribuiu poderosamente para a difusão da Teoria de Maxwell.

Consciente de que esta teoria não esclarecia nem tinha conseguido ainda aquilo que, de facto, a completaria, preocupou-se com a Electrodinâmica dos Corpos em Movimento.

Aí definiu uma linha de investigação onde avultou Lorentz e culminaria com Einstein: desinventor do éter e criador da Teoria da Relatividade.

A nossa profunda admiração e respeito para o físico ilustre, lógico, consistente e corajoso que foi e soube ser Heinrich Rudolf Hertz, erros que teve, foram, quem sabe, virtudes de inteligência, lógica e carácter.

REFERÊNCIAS

Lídia Salgueiro, "Por ocasião do 1.º Centenário da morte de Heinrich Hertz *Memórias da Academia das Ciências de Lisboa, Classe de Ciência,* vol. XXXIV, 1994.

I. Adawi, *Centennial of Hertz' Radio Waves,* Am. J. Phys. 57 (2), February 1989.

Philip and Emily Morrison, *Heinrich Hertz,* Scientific American, 1957.

Joseph F. Mullingan, *Hermann von Helmholtz and His Students,* Am. J. Phys. 57 (1), January, 1989.

J. G. O'Hara e W. Pricha, *Hertz and the Maxwellians – A Study and Documentation of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation,* Peter Peregrinus Ltd., London, 1987.

Edmond Bauer, *L'Electromagnétisme – Hier et Aujourd'Hui,* Albin Michel, Paris, 1949.

M. J. de Abreu Faro, *Da Modernidade do Campo Electromagnético: Dos Fundamentos às Actuais Aplicações,* Departamento de Física, Universidade de Évora, 1990.

William Berkson, *Las Teorias de Los Campos de Fuerza – Desde Faraday hasta Einstein,* Alianza Universidad, Alianza Editorial, Madrid, 1985.

J. M. Sanchez Ron, *El Origen Y Desarrollo de la Relatividad,* Alianza Universidad, Alianza Editorial, Madrid, 1985.

Max Born, *Einstein's Theory of Relativity,* Dover Publications, New York, 1962.

M. A. Tonnelat, *Histoire du Principe de Relativité,* Flamarion, Paris, 1971.

Arthur F. Miller, *Albert Einstein's – Special Theory of Relativity – Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911) Addison – Wesley Publishing Company,* Reading, Massachussetts, 1981.

W. J. Baker, *A History of the Marconi Company,* Methuen and Co, London, 1970.

mateace
ELECTRICIDADE, S.A.

Manutenção de Seccionador em 15kV em Tensão

ENGENHARIA

PROJECTOS

MONTAGENS

MANUTENÇÃO

CONSULTADORIA

- **Trabalhos em tensão (TET BT/MT)**
- **Redes Aéreas e Subt. de BT.MT e AT**
- **Postos de transformação**
- **Coogeração de energia**
- **Instalações Industriais**
- **Loteamentos**
- **Utilização Racional de Energia Eléctrica (UREE)**
- **Equipes de Contagem e Telemedida**
- **Topografia**
- **Termografia**
- **Iluminação**
- **Fabrico e comercialização de Sinalizadores para Linha Aéreas**

SEDE: Rua Padre Manuel Bernardes, 85 Padrão da Légua 4465 - São Mamede de Infesta (Armazém) Telefs.: (02) 953 63 35/6 - 953 64 09 Fax (02) 951 67 41

Título: **IMAGENS**
Autor: Orlando Batista (Fotografias)
M. Luísa Polleri (Poemas)
Formato: 31 × 29 cm • *N.º de Páginas:* 96
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
***Esc.:* 6 500$00**

Título: **TRATADO DE TORDESILHAS**
Autor: Vasco Graça Moura, Luís Miguel Enciso Recio, Luís Adão da Fonseca, António Rumeu de Armas, Joaquim Veríssimo Serrão, Felipe Ruiz Martín
Formato: 22 × 30 cm • *N.º de Páginas:* 316 - 84 gravuras
Encadernação: Capa cartonada forrada a tecido
ISBN: 972-9157-30-8
***Esc.:* 24 150$00**

Título: **75 ARTISTAS EM PORTUGAL**
Autor: Margarida Botelho
Formato: 23 × 30 cm • *N.º de Páginas:* 312
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
***Esc.:* 10 000$00**

Título: **CANCIONEIRO DA AJUDA**
Edição Fac-similada do códice existente na Biblioteca da Ajuda
Formato: 35 × 45 cm • *N.º de Páginas:* 272
Encadernação: Capa cartonada e acondicionada num estojo
***Esc.:* 60 000$00**

castoliva editora, lda.

Título: **DONA ISABEL DE ARAGÃO (A Rainha Santa)**
Autor: A. De Vasconcelos
Formato: 16 × 23 cm • *N.º de Páginas:* Vol. I - 690; Vol. II - 644
Encadernação: Capa cartonada e acondicionada num estojo
ISBN: 972-9157-29-4
***Esc.:* 17 500$00**

Título: **INVENTÁRIO ARTÍSTICO DE PORTUGAL - Distrito de Beja**
Autor: Túlio Espanca
Formato: 23 × 29,5 cm • *N.º de Páginas:* Vol. I - 342; Vol. II - 523
Encadernação: Capa em cartolina
***Esc.:* 27 000$00**

Título: **PEREGRINAÇÃO**
Autor: Fernão Mendes Pinto
Formato: 20 × 28 cm • *N.º de Páginas:* 644
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
ISBN: 972-9157-23-5
***Esc.:* 5 500$00**

Título: **DOCUMENTAÇÃO HENRIQUINA**
Introdução e Organização: José Manuel Garcia
Formato: 20 × 28 cm • *N.º de Páginas:* 684
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
ISBN: 972-9157-32-4
***Esc.:* 8 000$00**

FAÇA JÁ A SUA ENCOMENDA PARA:

castoliva editora, lda.

Rua Padre Luís Campos, 686 – Vermoim – Apartado 1006 – 4471 MAIA Codex – PORTUGAL
Telef. (351-2) 944 82 45 / 948 88 05 – Fax (351-2) 948 77 07

CONTROLO E PREVISÃO DE AVARIAS EM MOTORES DE AVIÃO POR EDXRF

F. Alves
Laboratório Químico, TAP- Air Portugal
P. Rosa Pereira
Departamento de Química e Bioquímica
da Faculdade de Ciências de Lisboa
A. Estêvão Candeias
Departamento de Química da Universidade de Évora
Original submetido em: 26 de Janeiro de 1996

RESUMO

Na sequência do trabalho desenvolvido para controlo de motores da TAP-Air Portugal através da análise de óleos lubrificantes implementou-se a análise de limalhas em suspensão por fluorescência de raios-X. Neste trabalho apresentam-se alguns aspectos relevantes dos métodos desenvolvidos bem como alguns casos reais da sua aplicação.

1. INTRODUÇÃO

Cada tipo de motor da TAP-Air Portugal é sujeito a um esquema de manutenção adequado às suas características. Uma das componentes desta manutenção é a detecção antecipada de possíveis avarias provocadas por desgaste dos componentes metálicos do motor. Quando estes componentes se encontram em contacto com o sistema de lubrificação do motor, as partículas metálicas provocadas pelo referido desgaste ficam em suspensão no óleo. Se essas partículas forem de dimensão inferior a 10 μm então a sua detecção é possível mediante a análise do óleo por Absorção Atómica [1].

É quando a dimensão das partículas se torna demasiado elevada para permitir a sua detecção por absorção atómica que toma especial importância a existência de bujões magnéticos e filtros no sistema de lubrificação.

Os bujões magnéticos são pequenas sondas que vêm sendo utilizadas nos motores desde o princípio dos anos sessenta. A sua localização preferencial no motor é junto de filtros ou nas caixas de acessórios e engrenagens, e o objectivo da sua utilização é a captação de limalhas magnéticas para controlo do desgaste do material. Para que esse objectivo seja conseguido os bujões encontram-se posicionados no sistema de recuperação do óleo e em locais onde a sua velocidade é reduzida, permitindo assim uma captação eficaz.

Ao serem detectadas estas limalhas vários pormenores há a ter em conta; a quantidade de partículas capturadas, visto que um elevado número de partículas pode ser, por si só, sinal de que um desgaste importante está a ocorrer, e por outro lado o aspecto das mesmas e o seu comportamento na presença dum campo magnético.

O passo seguinte consiste em analisar estas partículas recorrendo à técnica de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) [2] por forma a tentar identificar a sua composição e consequentemente a liga a que pertencem. Sabendo isto, é possível, mediante a consulta do diagrama de materiais do respectivo motor, saber quais as peças que poderão estar na origem dessas limalhas, possibilitando desta forma a sua substituição sem provocar possíveis danos no motor.

O uso da técnica de EDXRF para análise de ligas metálicas tem vindo a desempenhar um papel de extrema importância visto permitir, de uma forma

não destrutiva, a determinação simultânea de um grande número de elementos [3-6]. Os primeiros trabalhos relativos à aplicação desta técnica para a análise de ligas remontam ao início dos anos sessenta [7-8].

A detecção atempada de desgastes nas peças constituintes dos motores é de extrema importância uma vez que os danos provocados pelo desgaste do material podem causar a paragem do motor em pleno voo. Tal é um factor de importância capital quer para a segurança do avião e passageiros quer em termos económicos, visto que a necessidade de substituir um motor fora da base acarreta elevados encargos financeiros.

A análise por fluorescência de raios-x de limalhas dos motores da TAP-Air Portugal vem sendo efectuada desde há alguns anos pelo INETI recorrendo a uma técnica de microscopia electrónica de varrimento (SEM) associada a um espectrómetro de energia dispersiva (EDS). No entanto apenas eram analisadas algumas partículas do motor Rolls Royce RB211-524B4.

Neste trabalho foram analisadas limalhas do motor Rolls Royce RB211-524B4 (que designaremos por RB211) e com muito menor frequência algumas provenientes do CFMI CFM56-3B2 (designado por CFM56). A escolha recaiu sobre estes motores por serem aqueles onde os bujões magnéticos capturam um maior número de partículas, especialmente no caso do RB211. Refira-se que os motores Pratt & Whitney JT8D-17A não dispõem de bujões magnéticos o que "obriga" a que sejam acompanhados por análises de absorção atómica.

Vejamos o trabalho desenvolvido com cada um dos motores estudados [9].

2. ROLLS ROYCE RB211-524B4

O programa de controlo do sistema de lubrificação do RB211 é o seguinte:

- Análise dos bujões magnéticos
  Número de bujões: 6
  Tipo de bujões: principal (master), rolamento de impulso (LB - location bearing), caixa de acessórios (HSG – high speed gearbox) e três situados na zona de rolamentos – LP, IP e HP (respectivamente low, intermediate e high pressure).
  Periodicidade de inspecção: master, LB e HSG após voos de longo curso. LP, IP e HP apenas quando solicitado.

- Análise de filtros
  Tipo de filtros: *a*) filtro de pressão descartável de 30 μm
  b) filtro de recuperação metálico de 75 μm
  Periodicidade de inspecção: *a*) uma vez por ano
  b) 390 horas de voo

O programa de análise das limalhas provenientes dos motores foi dividido em duas fases; na primeira os resultados eram obtidos em face de uma análise qualitativa dos espectros, enquanto na segunda foram desenvolvidos métodos de análise quantitativos que permitissem obter a composição química das limalhas.

As análises foram efectuadas num aparelho da Oxford modelo XR400.

2.1. Análise qualitativa

O primeiro passo desta fase foi traçar o espectro dos padrões das ligas do motor RB211 disponíveis. Existem no laboratório seis padrões das seguintes ligas:

- ADX
- ADQ,
- MS270,
- S82,
- S106,
- EN31.

A base deste processo consiste na obtenção de espectros das limalhas encontradas nos bujões magnéticos ou nos filtros e posterior comparação destes com os espectros dos padrões das ligas atrás mencionadas. Para identificação da liga podem seguir-se as indicações expressas na tabela 1.

Tabela 1 – Esquema de identificação das partículas do motor RB211.

1.° Passo Existência de Tungsténio (W)	2.° Passo Existência de Niquel (Ni)	3.° Passo Existência de Vanádio (V) ou Molibdénio (Mo)	4.° Passo Identificação
Existe W	Existe Ni	Existe V	ADX
	Não existe Ni	Existe V	ADQ
Não existe W	Existe Ni	Existe Mo	S82
		Existe V e Mo	MS270
	Não existe Ni		EN31
		Existe Mo	S106

Como será de calcular existe um conhecimento de quais as ligas que ao sofrerem desgaste podem pôr em risco o funcionamento do motor. Por exemplo, ligas como o EN31 e o S82 permitem que o motor possa continuar a voar, embora seja aconselhável encurtar os intervalos de verificação dos bujões. Ao contrário, a detecção de ADQ, cuja dureza pode levar ao corte do motor no período de apenas vinte horas após os primeiros indícios de degradação das esferas, rolos ou pistas de rolamentos, implica um controlo extremamente rígido dos bujões ou mesmo a substituição do motor.

2.2. Análise quantitativa

Embora todos os casos de detecção de problemas com componentes de ADQ obtidos mediante uma análise qualitativa tenham sido confirmados pela oficina de motores, este processo é bastante falível. Compare-se os espectros do padrão de ADX e do padrão de ADQ, figuras 1 e 2, respectivamente, e observe-se como estes são muito semelhantes. Em espectros de limalhas de pequenas dimensões, em que o ruído de fundo é geralmente muito superior, torna-se bastante complicado distinguir estas duas ligas, correndo-se o risco de se substituir um motor que poderia continuar a voar em segurança.

Para permitir a dissipação destas dúvidas foi implementado um método de análise quantitativa que permite obter a composição das limalhas relativamente aos elementos mais importantes da sua liga.

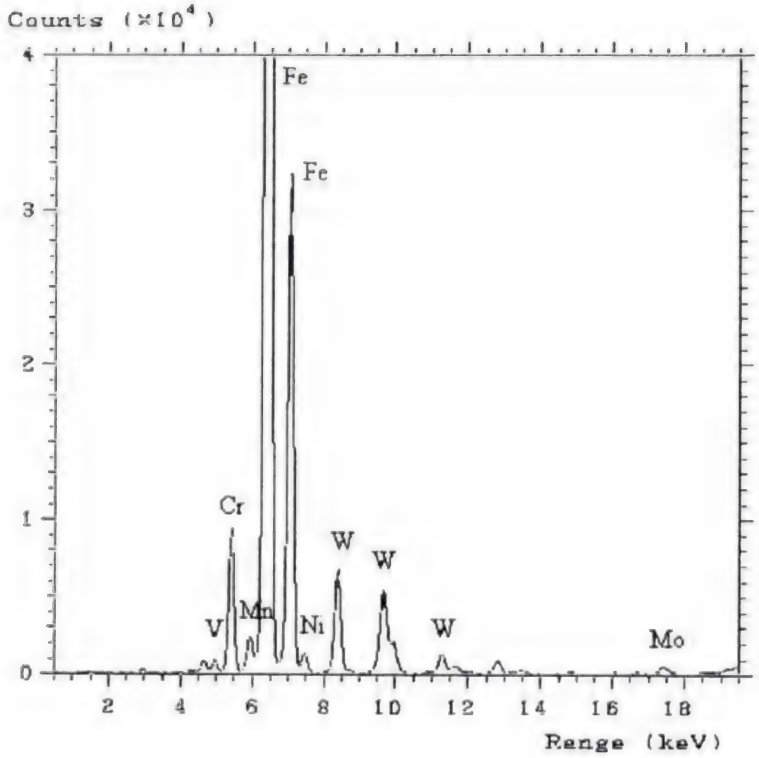


Figura 1 – Espectro do padrão de ADX

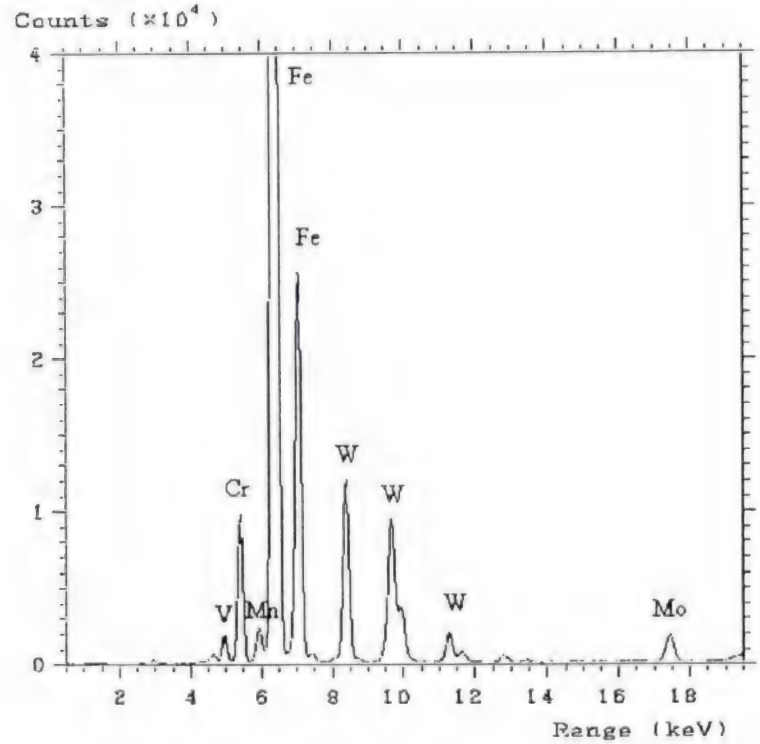


Figura 2 – Espectro do padrão de ADQ

Para implementar tal método, o primeiro parâmetro a definir é acerca das condições experimentais a utilizar. Após a realização de alguns ensaios pre-

liminares as condições escolhidas para a implementação deste método foram as apresentadas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Condições experimentais

Voltagem/KV	Corrente/μA	Filtro	Tempo aquisição/s	Colimador/mm
45	140	nenhum	200	4

Tabela 3 – Elementos e linhas analisadas.

Elementos analisados	Linha
V	K_a
Cr	K_a
Mn	K_a
Fe	K_a
W	L_a
Mo	K_a

Para calcular a percentagem dos diferentes elementos existentes nas amostras analisadas recorre-se ao método dos parâmetros fundamentais [10-12] optimizado com um ajuste dos mínimos quadrados dos mesmos [13].

Como exemplo apresenta-se na tabela 4 o resultado da análise quantitativa do padrão de ADQ.

Tabela 4 – Resultado da análise do padrão de ADQ

Elemento Analisado	Valores Tabelados	Resultado da análise
V	1.27	1.42
Cr	4.59	4.99
Mn	0.42	0.32
Fe	75.15	79.33
Ni	–	–
W	18.6	13.71
Mo	–	–

O último passo referente ao motor RB211 consistiu na utilização do software disponível no aparelho, o qual permite que sejam armazenados em memória os resultados da análise quantitativa dos padrões. Ao fazê-lo é ainda possível adicionar a verdadeira composição dos padrões no que se refere aos elementos analisados. Introduzindo este ficheiro no método este, ao analisar uma amostra, compara o resultado obtido com o dos diversos padrões com base no tratamento estatístico do χ^2 (Qui-Quadrado), referenciando para qual dos padrões esse valor é menor. O valor de χ^2 é obtido a partir da expressão [14]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(N_i - N_{pi})^2}{N_{pi}} \qquad (1)$$

Onde n é o número de elementos analisados e N_i e N_{pi} são, respectivamente, a percentagem do elemento i na amostra e no padrão.

Foram efectuados vários testes com o objectivo de verificar a eficácia do método. Quando se analisaram os próprios padrões obtiveram-se valores de χ^2 na ordem das décimas, valores que não foram sequer aproximados quando se utilizaram limalhas. Neste último caso o valor de χ^2 anda na ordem de 10-15. Embora com um χ^2 muito mais elevado todas as limalhas usadas nos testes foram correctamente identificadas, o que prova a validade do método implementado.

3. CFMI CFM56-3B2

Comecemos por ver qual o programa de controlo de motores dos CFM56, que para o caso do CFM56-3B2 é o seguinte:

- Análise dos bujões magnéticos
  Número de bujões: 3
  Posição dos bujões: colector posterior, colector anterior, caixa de engrenagens.
  Periodicidade de inspecção: bujão do colector posterior – 50 horas de voo restantes bujões - 120 horas de voo
- Análise de filtros
  Tipo de filtros: *a*) filtro de pressão descartável de 15 μm
  b) filtro de recuperação descartável de 25 μm
  Periodicidade de inspecção: *a*) 15 meses
  b) 850 horas de voo

O esquema de análises referente a este motor foi em tudo semelhante ao utilizado para o motor RB211 pelo que não será necessário desenvolver em pormenor aquilo que foi feito.

Os padrões utilizados para as análises das partículas do motor CFMS6 foram:

- 40CDV12, – Z12CDNV12,
- 40NCD7, – Z20WC10,
- M50, – M50NIL.

Neste caso há que ter em especial atenção o aparecimento de limalhas de M50 e M50NIL que podem causar problemas semelhantes aos provocados pelo ADQ no motor RB211.

Quanto às condições experimentais seleccionadas para a implementação do procedimento para a realização de análises quantitativas estas são em tudo semelhantes às do procedimento para o motor RB211, com excepção da corrente que neste caso é de 50 μA. Os elementos analisados são os mesmos nos dois motores.

4. DESCRIÇÃO DE CASOS REAIS

Em sequência das análises efectuadas oito motores RB211 foram romovidos devido a terem sido detectadas limalhas ou poeira de ADQ. Todas as remoções se mostraram justificadas uma vez que estes motores foram, posteriormente, abertos na oficina tendo em todos os casos sido confirmado um desgaste excessivo das esferas e pistas do rolamento LP, composto de ADQ. Num dos casos detectou-se ainda um descasque na gaiola, que era o responsável pelo aparecimento de limalhas de prata e cobre, pois esta gaiola é feita de aço com um depósito electrolítico de cobre que serve de base para um outro depósito, desta vez, de prata.

Apresentam-se nas figuras 3 a 6, a título de exemplo, os espectros das análises dos três primeiros casos que conduziram à remoção dos respectivos motores.

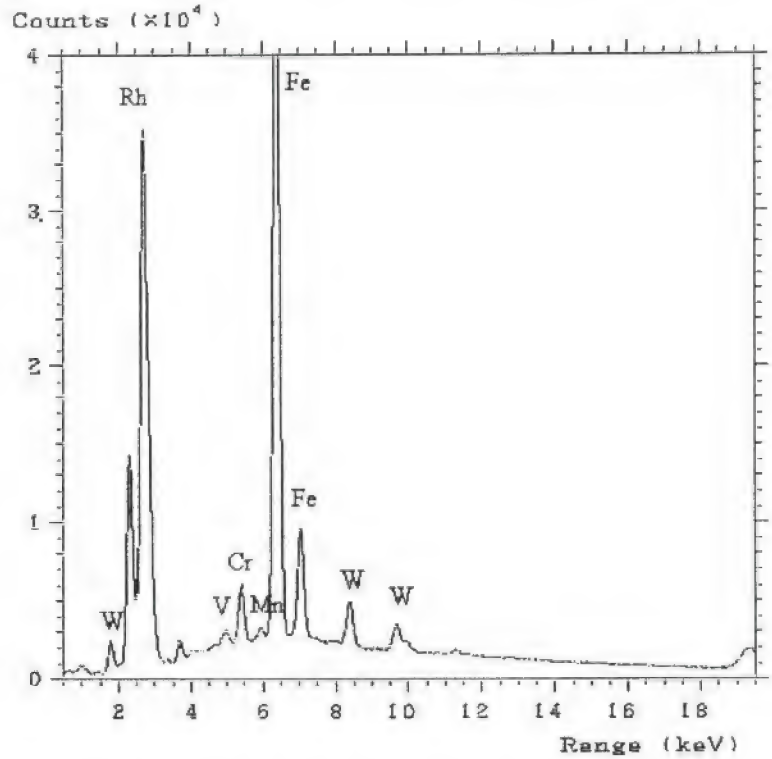


Figura 3 – Espectro da análise efectuada à limalha encontrada no bujão LP do motor RB2116. Liga identificada como ADQ.

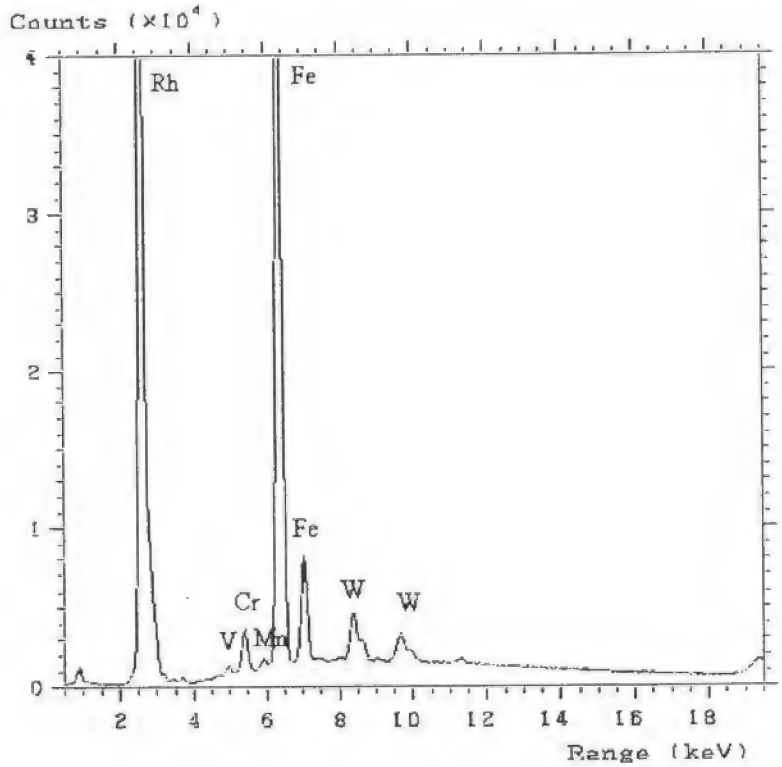


Figura 4 – Espectro da análise efectuada à limalha encontrada no filtro de recuperação do motor RB2117. Liga identificada como ADQ.

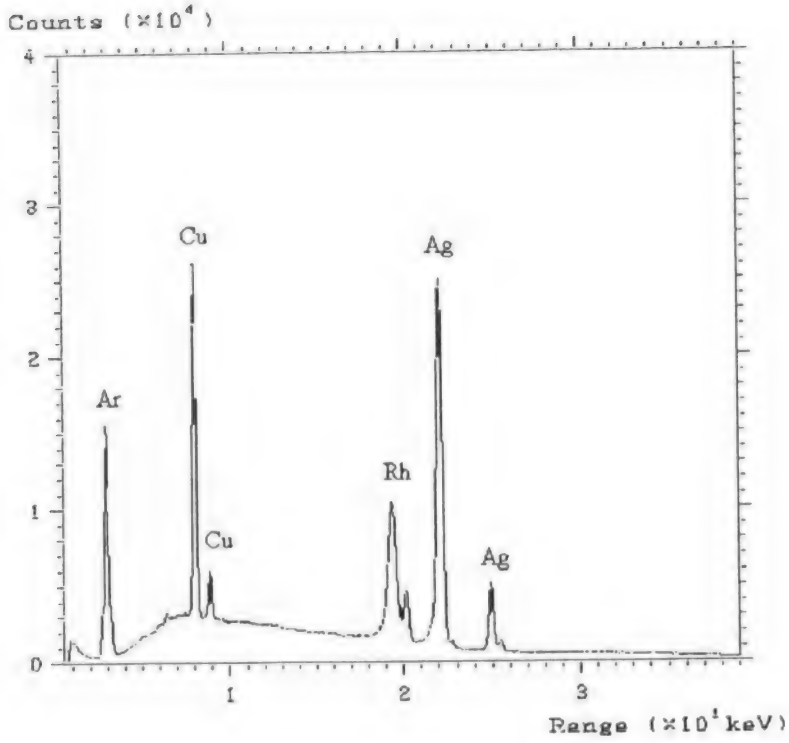


Figura 5 – Espectro da análise efectuada à limalha encontrada no filtro de recuperação do motor RB2117. Identificou-se prata e cobre.

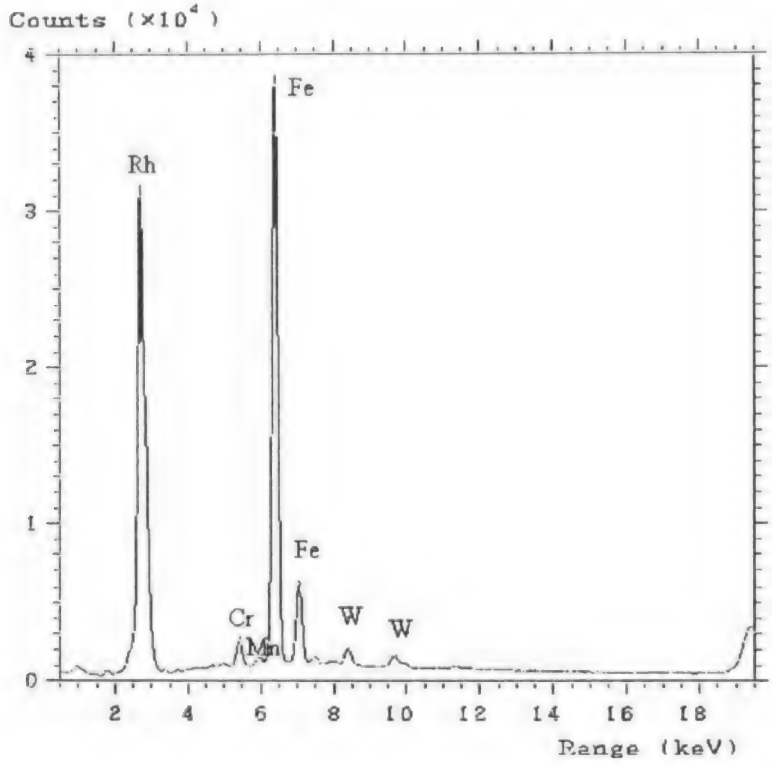


Figura 6 – Espectro da análise efectuada à limalha encontrada no bujão LB do motor RB2121. Liga identificada como ADQ.

Apenas para termo de comparação, a limalha que deu origem à remoção do motor RB2117 foi analisada pelo INETI. O relatório da análise desta limalha apresenta a conclusão: "Aço compatível com ADQ".

5. CONCLUSÕES

O facto de ter sido confirmado o desgaste de peças de ADQ em todos os motores em que foram detectadas limalhas dessa liga é, por si só, conclusivo quanto à validade dos métodos implementados, em particular, e da técnica de EDXRF para este tipo de análises.

No entanto, as diferenças encontradas entre os resultados das análises, obtidos através do método dos parâmetros fundamentais, e os valores tabelados de composição química das ligas estudadas (ver tabela 4) aconselham a comparação desses resultados com os provenientes da análise de padrões das ligas existentes nos reactores.

6. REFERÊNCIAS

[1] Candeias, A., *Contribuição para o programa de controlo de reactores da TAP-Air Portugal,* Relatório de estágio para a obtenção de licenciatura, Faculdade de Ciências de Lisboa, 1992.

[2] Dziunikowski, B., *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis,* Wilson and Wilson's, Comprehensive Analytical Chemistry, Vol. XXIV, Elsevier, 1989.

[3] Dahl, M. and Karlsson, A., *X-Ray Spectrometry,* **2**, p. 75, 1973.

[4] Rhodes, J. R., Packer, T. W. and Boyce, I. S., in: *Radioisotope Instrumenls in Industry and Geophysics (Proc. Symp. Warsaw 1965),* IAEA, Viena, Vol. 1, p. 127, 1966.

[5] Gesicki, A., Jagielak, J. and Lang, B., *Radiochem. Radiounal. Lett.,* **26,** p. 127, 1976.

[6] Hope, J. A. and Watt, J. S., *Int. J. Radiat. Isot.,* **16**, p. 9, 1965.

[7] Ziegler, C. A. and McCue, J. C., *Int. J. Appl. Radiat. Isot.,* **12**, p. 1, 1961.

[8] Górski, L., *Kernenergie,* **6**, p. 710, 1963.

[9] Pereira, P. R., *Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia--Implementação de Métodos de Análise,* Relatório de estágio para a obtenção de licenciatura, Faculdade de Ciências de Lisboa, 1993.

[10] Criss, J. W. and Birks, L. S., *Anal. Chem.,* **40**, p. 1080, 1968.

[11] Sherman, J., *Spectrochim. Acta,* **15**, p. 446, 1959.

[12] Zhang Li-Xing, *X-Ray Spectrometry,* **13**, p. 52, 1984.

[13] Poehn, C., Wernisch, J. and Hanke, W., *X-Ray Spectrometry,* **14**, p. 120, 1985.

[14] Murteira, B. J. F., *Probabilidades e Estatística,* Editora McGraw-Hill de Portugal, Lda., 1980.

TÉCNICA, nº 1 MAR. 97

aeist

Associação dos Estudantes do
Instituto Superior Técnico

Secção de Folhas

Somos especialistas em fotocópias de qualidade!

Fotocópias a cores e a preto.

Encadernações e plastificações.

Impressão rápida e entrega imediata.

Temos os melhores preços do mercado!

Contacte-nos!

Av. Rovisco Pais
1000 Lisboa

Tel.: 848 08 80
Fax: 848 40 14

Palavras-chave: jactos coaxiais turbulentos; velocimetria laser; mistura turbulenta
Keywords: coaxial turbulent jets; Laser Velocimetry; turbulent mixing

CARACTERIZAÇÃO DE JACTOS COAXIAIS TURBULENTOS COM E SEM RECIRCULAÇÃO

Isabel S. Carvalho e Manuel V. Heitor
Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica
Original submetido em: 26 de Abril de 1996

RESUMO

O escoamento turbulento de jactos coaxiais com e sem rotação é estudado em detalhe, sendo identificado o estabelecimento de escoamentos com recirculação induzidos pela rotação. O efeito da rotação em jactos coaxiais é estudado com base em medidas detalhadas do campo de velocidades do escoamento a jusante de um modelo de atomizador industrial.

ABSTRACT

Laser-Döppler measurements of the mean and turbulent velocity characteristics of coaxial jets stabilized downstream of a model prefilming airblast atomizer with a conical shape are presented and discussed. The results include the analysis of the effect of swirling the outer jet on the mixing performance of the injector, which is associated with the occurrence of a recirculation zone in the vicinity of the nozzle characterized by increased turbulence levels.

1. INTRODUÇÃO

De um modo geral, os sistemas de queima e as câmaras de combustão em turbinas a gás e de motores de combustão interna são caracterizados por uma ou mais correntes coaxiais de fluido, com uma configuração geométrica adequada a favorecer o processo de mistura entre o oxidante e o combustível (Winterfeld et al., 1990; Dodds e Bahr, 1990). Neste contexto, este trabalho foi realizado no âmbito de um estudo sistemático de jactos livres para diferentes condições de operação representativas de escoamentos em atomizadores industriais que potenciem a redução da emissão de poluentes e maximizem a eficiência térmica dos processos de queima.

Uma das características dos escoamentos de jacto simples em ambiente em repouso, é o aumento da dimensão radial do jacto devido ao arrastamento de fluido do meio ambiente. A taxa de arrastamento para geometrias de jactos simples (e.g., Ricou e Spalding, 1961; Crow e Champagne, 1971; Hinze, 1975) encontra-se dependente da geometria do orifício e do tipo de escoamento, verificando-se que sucessivos aumentos de número de Reynolds, Re, são acompanhados de um pequeno decréscimo (cerca de 10%) da taxa de arrastamento (Ricou e Spalding, 1961). Por outro lado, um aumento do nível de turbulência para valores de Re constantes, implica um aumento significativo da taxa de arrastamento (Kuhlman, 1987). Adicionalmente, a introdução de rotação num jacto cilíndrico simples pode duplicar aquela taxa. De igual modo, para um jacto anular pode observar-se o aumento da taxa de arrastamento na região vizinha da saída, com pequenas variações daquela taxa nas regiões a jusante. O decaimento da velocidade do jacto e a taxa de crescimento da sua largura são idênticas às observadas para um jacto cilíndrico, mas verifica-se a deslocação da origem virtual para montante.

No caso dos jactos com rotação, o aumento da taxa de arrastamento do fluido exterior está associado a um mínimo de pressão no centro do escoamento, acompanhado por um decréscimo mais rápido da velocidade média e um mais rápido aumento da intensidade turbulenta (Chigier e Chervinsky, 1967; Pratte e Keffer, 1972). De um modo geral, o núcleo do vórtice é caracterizado por uma variação linear da velocidade de rotação ($W \alpha r$). A posição radial para qualquer localização axial onde $W = 0$ é tomada como o centro do vórtice e a distância radial entre os máximos de rotação (positivo e negativo) é utilizada como medida quantitativa do diâmetro do núcleo.

Em jactos coaxiais sem rotação, o desenvolvimento da região na vizinhança da saída é influenciado pela razão de velocidades das duas correntes e pela geometria da zona de separação entre elas (Champagne e Wygnanski, 1971; Durão e Whitelaw, 1973; Ribeiro e Whitelaw, 1975, 1976; 1980a, b;

Nina, 1979 e Moreira, 1991). Além disso, as características das camadas limite no plano de saída influenciam esta região. A maioria dos estudos realizados indicam um desenvolvimento mais rápido face ao jacto simples, com origem na região de mistura entre os dois jactos, onde a ocorrência de libertação de vértices demonstrou ter um papel determinante no desenvolvimento do escoamento.

Diversos estudos anteriormente efectuados (Baker et al., 1975; Vu e Gouldin, 1981) mostraram a não isotropia da turbulência nos escoamentos isotérmicos, o aumento das regiões não isotrópicas na presença de combustão, e a necessidade de considerar as três tensões normais nos modelos de turbulência adequados.

Medições de quantidades turbulentas, para além de velocidades médias, foram efectuadas por Champagne e Wygnanski (1971), Durão e Whitelaw (1973), Ribeiro e Whitelaw (1976, 1980a, b). Estes investigadores apresentam informação detalhada da distribuição das propriedades turbulentas contribuindo para uma melhor compreensão da influência da razão de velocidades inicial no desenvolvimento do escoamento. Ribeiro e Whitelaw (1976) estudaram o caso em que a razão de velocidades é igual à unidade, dando particular atenção à região a jusante do escoamento interno, onde verificaram a ocorrência de libertação de vórtices. Ribeiro e Whitelaw (1980a, b) apresentam medidas detalhadas do campo médio e turbulento de velocidades e distribuições de probabilidade conjunta em jactos coaxias com rotação, sugerindo que a turbulência é produzida na camada de corte do jacto exterior e é transportada para a linha central por flutuações de grandes escalas.

O efeito da rotação em jactos coaxiais é estudado neste artigo, com base em medidas detalhadas do campo de velocidades do escoamento a jusante de um modelo de atomizador industrial.

Este artigo encontra-se dividido em quatro partes incluindo esta Introdução. A secção 2 é dedicada à descrição da instalação e do atomizador modelo analisado, identificando-se as diferentes configurações e escoamentos estudados e referindo-se, ainda, a técnica experimental usada para a medição de velocidades. A secção 3 é dedicada à apresentação e análise dos resultados, enquanto que na última secção se resumem as conclusões mais relevantes deste estudo.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

2.1. Instalação Experimental

A instalação experimental utilizada neste trabalho encontra-se instalada na Secção de Termodinâmica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, e foi concebida de modo a possibilitar o estudo de diferentes tipos de atomizadores comerciais, assim como de modelos laboratoriais. O atomizador em relação ao qual se apresentam alguns resultados, encontra-se representado na Figura 1, sendo constituído por três cones coaxiais: i) um cone interior com um diâmetro de 5 mm; ii) um cone intermédio para alimentação de água que pode originar a formação de filmes de líquido de espessuras de 0.2 e 0.7 mm; e iii) um cone exterior com um diâmetro de 40 mm.

Para a geração de rotação no ar de atomização recorre-se a uma câmara de rotação com um número de entradas tangenciais variável. O atomizador está montado na vertical, encontrando-se fixo. Sob o atomizador foi colocada uma mesa de atravessamento 3-D.

Os escoamentos estudados encontram-se apresentados na Tabela 1, referindo-se para cada um os valores da velocidade, do caudal mássico e do número de Reynolds dos jactos primário e secundário. Para o ar secundário refere-se, também, o número de rotação, S.

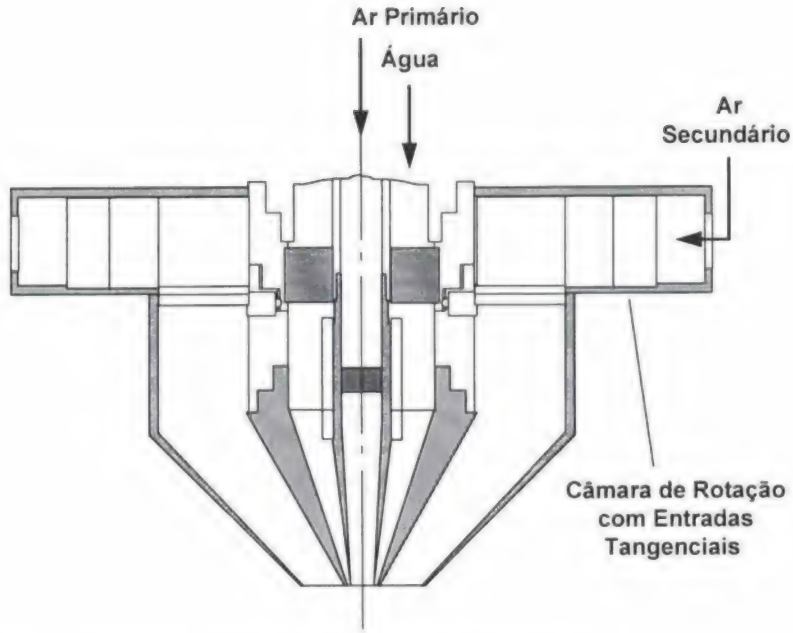


Figura 1 – Pormenor do atomizador do tipo "airblast" com pré-filme.

Tabela 1 – Parâmetros característicos dos escoamentos estudados

CASO	AR PRIMÁRIO (INTERIOR)			AR SECUNDÁRIO (EXTERIOR)				OBSERVAÇÕES
	U_i (m/s)	m_i (g/s)	Re_i x10^{-3}	U_o (m/s)	m_o (g/s)	Re_o x10^{-3}	S	
1	19.9	0.46	6.42	0	0	0	–	Jacto simples
2	21.1	0.48	6.81	20.0	28.5	45.2	0	Jactos coaxiais sem rotação $U_i/U_o = 1$
3	25.0	0.58	8.07	12.1	17.2	27.3	2.5	Jactos coaxiais com rotação $U_i/U_o = 2.1$

2.2. Instrumentação

A medição de velocidades do escoamento foi efectuada com um velocímetro laser, operando com duplo feixe ("dual beam") e com colecção de luz do lado oposto à fonte de luz laser ("forward scatter mode"). Foi utilizado um laser de Argon-Ion (Spectra-Physics-165) de potência máxima de 1 W e funcionando a um comprimento de onda de 514.5 nm. Para evitar a ambiguidade direccional e possibilitar medir o sentido do escoamento, utilizaram-se duas células de Bragg que permitem obter um desfasamento de frequências ("frequency shift") entre 0 e 10 MHz. No sistema de transmissão de luz foi utilizada uma lente de 310 mm de distância focal, sendo o ângulo de intersecção dos raios de 9.24°. O espaçamento entre as franjas de interferência foi de 3.062 μm, tendo o volume de controlo resultante a forma de um elipsóide de dimensões 0.135 e 1.676 mm. O sistema de colecção de luz dispersada, posicionado a 180° ("forward scatter") em relação à fonte de luz laser, inclui uma lente de 150 mm de distância focal e um fotomultiplicador (OEI, LD-O-810) com um orifício de 300 μm.

O sinal do fotomultiplicador é filtrado num filtro "passa banda" para remoção do pedestal e do ruído de alta frequência e processado por um contador de frequências ("frequency counter", TSI, 1980 B) e continuamente visualizado num osciloscópio (National, VP-5231A 30). Cada medida foi sujeita a uma

validação em amplitude e tempo, sendo posteriormente transferida para um computador IBM 386/33 MHz. O número de ciclos Döppler, a amplitude de validação e a tolerância para validação em tempo foram especificadas através do computador, assim como o número total de medidas em cada ponto (mínimo de 10 000) a serem validadas e armazenadas em memória para processamento posterior. A Figura 2 apresenta um diagrama do sistema de aquisição e processamento de sinal.

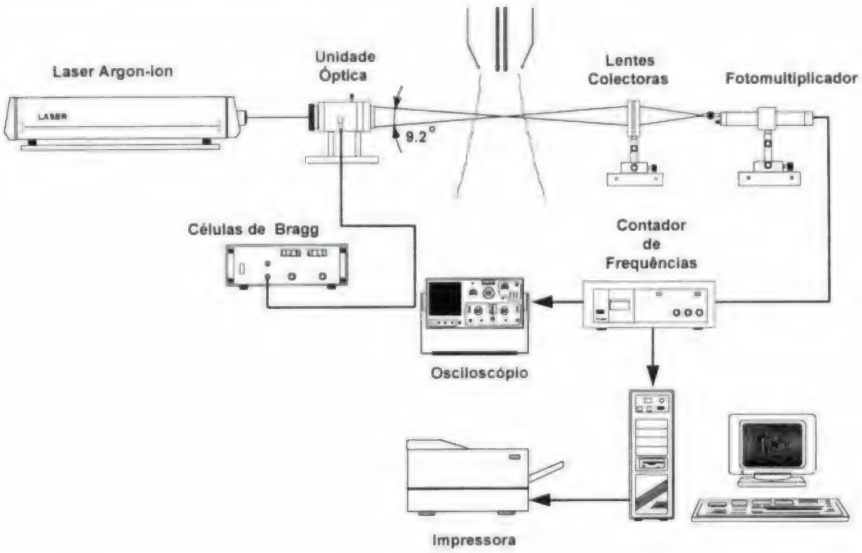


Figura 2 - Esquema do velocímetro laser.

O sistema de atravessamento, no qual está montado o velocímetro laser inclui três tipos de movimento de translação: dois na horizontal, que permitem atravessamentos radiais, outro vertical, que permite atravessamentos longitudinais. A precisão do posicionamento do volume de controlo é de ± 0.2 mm.

Nos jactos interior e exterior introduziu-se, separadamente, parafina líquida após a sua passagem por atomizadores de aerosol. Foram também introduzidas partículas no ar ambiente. A dimensão destas partículas é de, aproximadamente, 1 μm (Durst et al., 1981).

Foram medidos os valores das componentes axial, $\overline{U}$, radial, $\overline{V}$, e tangencial, $\overline{W}$, da velocidade média e turbulenta. As componentes axial e radial foram medidas fazendo atravessamentos do volume de controlo ao longo de um plano horizontal de simetria. A componente tangencial foi medida efectuando o atravessamento do volume de controlo segundo um plano horizontal de simetria a 90° do plano onde $\overline{U}$ e $\overline{V}$ são medidos. Foram medidos perfis axiais e radiais para várias distâncias da saída do atomizador, referidos a uma coordenada adimensional, x/D_i e r/D_i, onde D_i é o diâmetro do jacto central e é igual a 5 mm. A velocidade tangencial foi considerada positiva no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio. As distribuições das tensões de corte turbulentas, $\overline{u'v'}$ e $\overline{u'w'}$, são obtidas de medidas conjuntas nos planos anteriormente referidos e em planos a 45° (Melling e Whitelaw, 1975). Uma análise detalhada da precisão dos resultados encontra-se apresentada em Carvalho (1995).

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos para os escoamentos de jacto simples (caso 1), jactos coaxiais sem rotação (caso 2) e jactos coa-

xiais com rotação caracterizados pela formação de uma zona de recirculação central (caso 3). Para todos os resultados que a seguir se apresentam, a velocidade de adimensionalização, U_i, é a velocidade média à saída do jacto central (ou interior).

3.1. Linha Central

A Figura 3 apresenta a distribuição adimensionalizada dos resultados da velocidade média axial e das respectivas tensões normais de Reynolds ao longo da linha central para os três casos estudados.

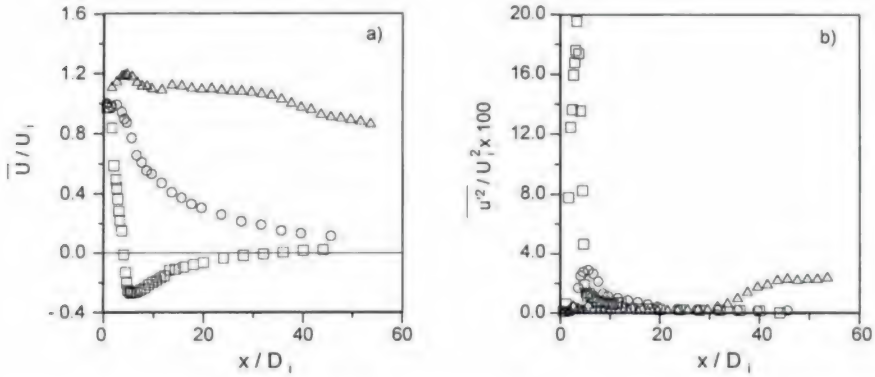


Figura 3 – Distribuição da velocidade axial média e turbulenta ao longo da linha central:
O Caso 1; Δ Caso 2; □ Caso 3
a) Velocidade axial média; b) Variância da velocidade axial média, $\overline{u'^2}/U_i^2 \times 100$

No escoamento de jacto simples (caso 1) a região perto da saída do atomizador é caracterizada pela existência de um cone potencial, até $x/D_i \approx 3$ dando, posteriormente, origem a um jacto desenvolvido. A jusante de $x/D_i \approx 3$ a velocidade axial média ao longo da linha central é inversamente proporcional a x/D_i, observando-se para $3 < x/D_i < 10$ um decréscimo rápido de $\bar{U}$. O valor da tensão normal cresce rapidamente até $x/D_i = 6$, tal como representado na Figura 3b, observando-se que o máximo da variância das flutuações velocidade axial, $\overline{u'^2}$, coincide com a região de maior gradiente da velocidade axial média, $\bar{U}$.

A Figura 4 compara a velocidade média axial ao longo da linha central para o caso estudado com resultados obtidos por outros investigadores (Champagne e Wygnanski, 1971; Durão e Whitelaw, 1973), verificando-se que o comprimento do cone potencial é pouco dependente do número de Reynolds.

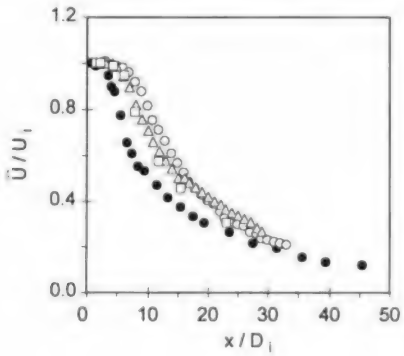


Figura 4 – Comparação da distribuição de velocidade axial média ao longo da linha central, para o caso 1, com as obtidas por outros estudos idênticos. ● Caso 1, $Re_i = 6.6 \times 10^3$; O Durão & Whitelaw (1973), $Re_i = 5.4 \times 10^3$; Δ Durão & Whitelaw (1973), $Re_i = 16.9 \times 10^3$; □ Champagne & Wygnanski (1971), $Re_i = 101.5 \times 10^3$.

Imediatamente a jusante do injector, forma-se um cone potencial caracterizado por uma velocidade e concentração de fluido constantes. Fora desta região observa-se a formação de uma camada de mistura na qual a transferência de massa e quantidade de movimento ocorre na direcção perpendicular ao escoamento, de forma qualitativamente de acordo com estudos anteriores (ver por ex., Ribeiro e Whitelaw, 1975 e Rajaratnam, 1976).

Para jactos coaxiais sem rotação (caso 2), a região perto da saída do atomizador é caracterizada por um rápido aumento da velocidade axial média até $x/D_i = 4$, seguida de uma zona de desaceleração do fluido até $x/D_i \approx 12$. Nesta região a velocidade turbulenta apresenta valores comparativamente baixos. Quer as componentes médias, quer as turbulentas, mantêm-se aproximadamente constantes entre $x/D_i = 15$ e $x/D_i = 30$. Somente para $x/D_i > 30$, quando $\bar{U}$ começa a decrescer, se pode observar um acentuado aumento da componente turbulenta.

A introdução de rotação no escoamento exterior (caso 3) resulta na formação de uma zona de recirculação induzida pelo estabelecimento de um gradiente radial de pressão adverso. A depressão induzida pela rotação do jacto exterior origina a formação de um vórtice cilíndrico à saída do atomizador, o qual está associado a um acentuado decaimento da velocidade média axial na região vizinha da saída. O ponto de estagnação a montante está localizado a $x/D_i = 4$. O máximo da velocidade inversa é de $-0.28U_i$ e encontra-se a $x/D_i = 5$, mas a zona de recirculação prolonga-se até $x/D_i = 36$ onde se observam valores baixos da componente turbulenta.

3.2. Perfis Radiais

As características globais destes escoamentos são claramente identificadas nas Figuras 5 e 6, que representam a projecção dos vectores de velocidade

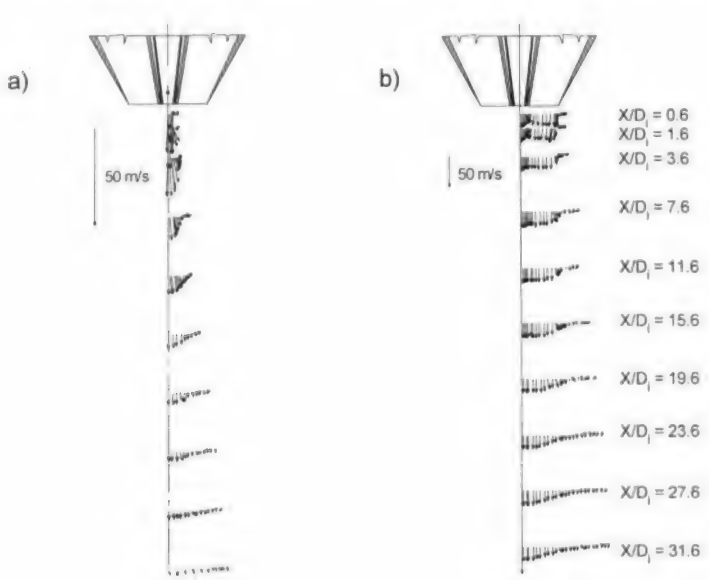


Figura 5 – Representação vectorial das projecções das componentes axial e radial do vector velocidade no plano de simetria. a) Caso 1; b) Caso 2

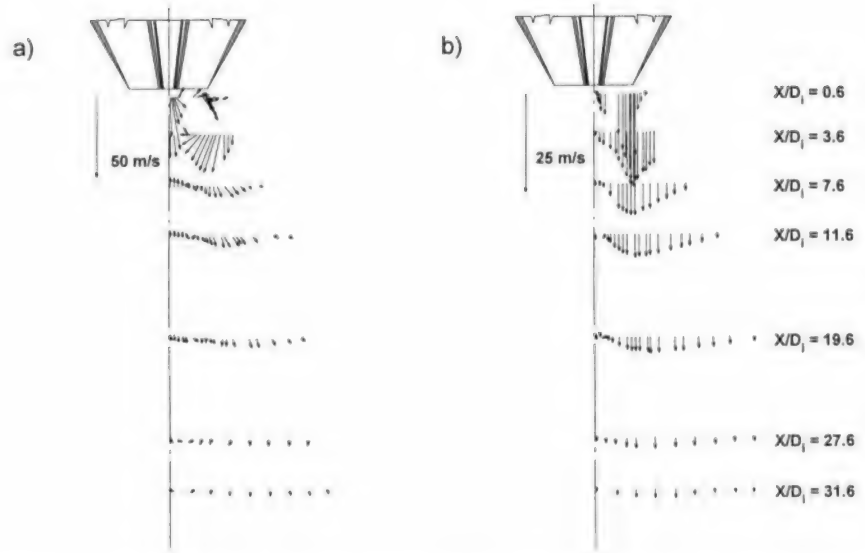


Figura 6 – Representação vectorial das projecções das componentes de velocidade no plano de simetria para o caso 3.
a) Projecção da componente axial e radial; b) Projecção da componente tangencial

no plano vertical de simetria. Recorre-se, ainda, à representação adimensionalizada dos resultados na forma de isolinhas, tal como representado nas Figuras 7 a 10, para a velocidade axial média, $\bar{U}/U_i$, a velocidade axial turbulenta, $\overline{u'^2}/U_i^2 x100$, a tensão de corte, $\overline{u'v'}/U_i^2 x100$, e a energia cinética turbulenta, $k/U_i^2 x100$.

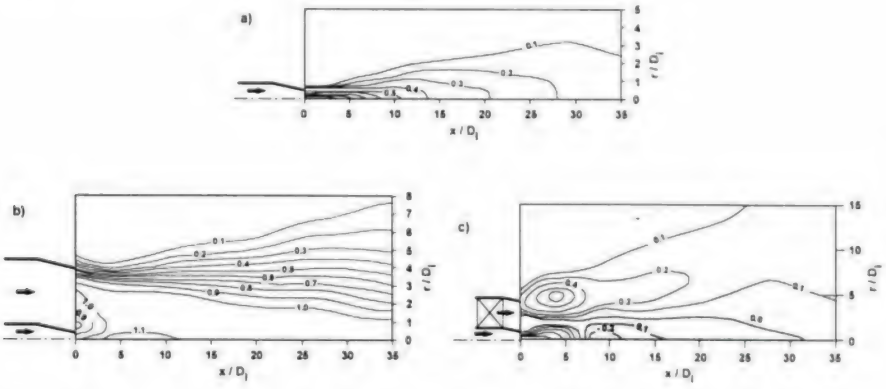


Figura 7 – Distribuição espacial da velocidade axial média, $\bar{U}/U_i$.
a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3

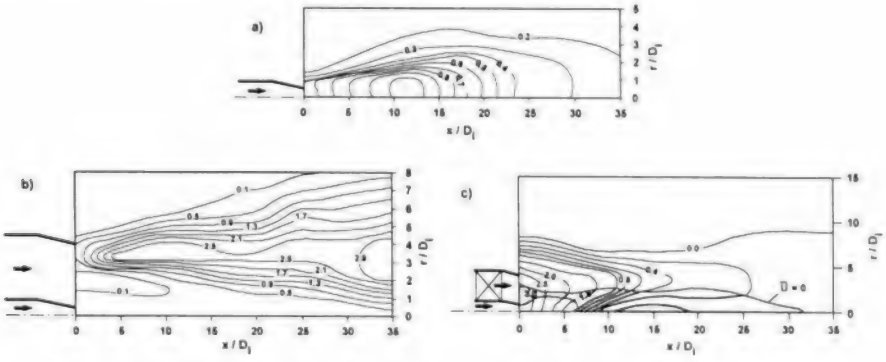


Figura 8 – Distribuição espacial das tensões normais de Reynolds, $\overline{u'^2}/U_i^2 x100$
a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3

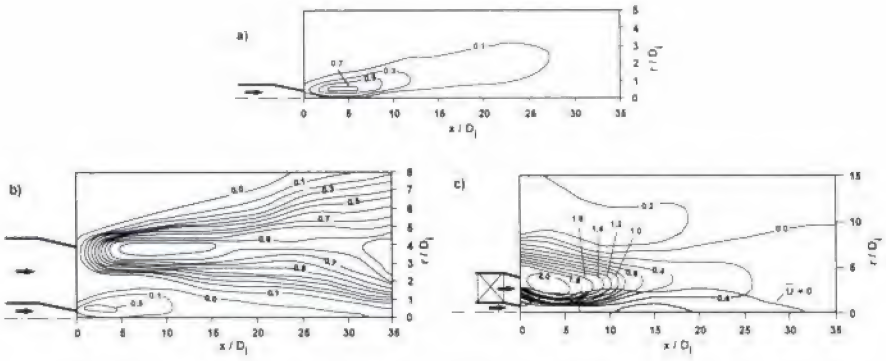


Figura 9 – Distribuição espacial de tensões de corte, $\overline{u'v'}/U_i^2 \times 100$.
a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3

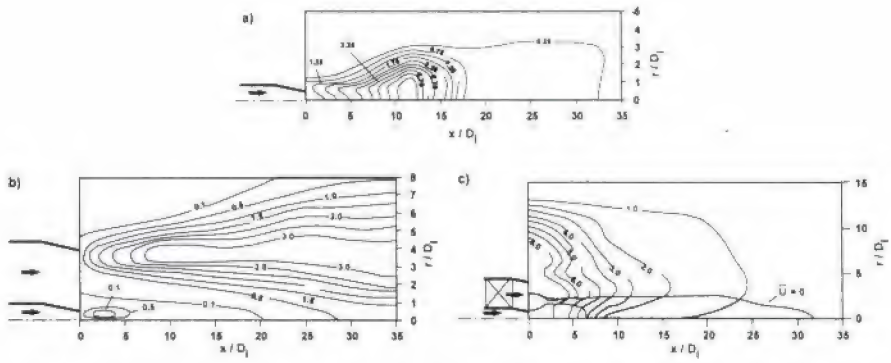


Figura 10 – Distribuição espacial da energia cinética turbulenta, $k/U_i^2 \times 100$.
a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3

Jactos simples

Iniciando esta análise e discussão dos resultados pelo escoamento de jacto simples, caso 1, pode observar-se que o jacto emergente do injector exibe um gradiente de velocidade muito elevado na região em contacto com o fluido ambiente, tal como se pode observar na Figura 5a). Este facto contribui para o aumento da mistura turbulenta entre o fluido emergente do injector e o fluido ambiente em repouso. Esta região, caracterizada por uma elevada difusão molecular de quantidade de movimento, possui características de uma camada de mistura, tomando a forma de um cone anular na periferia do jacto, e envolve uma região central cónica de escoamento potencial caracterizada por uma distribuição de velocidade axial constante.

Tipicamente, as duas camadas de mistura vão intersectar-se a uma distância da saída compreendida entre 4 a 6 diâmetros do injector (Rajaratman, 1979). Para distâncias da saída, em geral, superiores a 8 diâmetros do injector verifica-se a presença de uma região de auto-preservação do escoamento traduzida pela semelhança dos perfis de velocidade, quando devidamente adimensionalizados.

Entre estas duas regiões, de características tão diferentes, observa-se uma região intermédia. De facto, a existência de uma contracção súbita, origina um perfil radial de velocidades à saída do injector típico de um escoamento tampão, sem gradiente radial de velocidade na região central, seguida de uma região de alto gradiente na periferia (para $r/D_i = 0.5$). Esta região de alto gradiente irá originar um fluxo difusivo de quantidade de movimento relativamente grande, a que corresponderá um alargamento do escoamento. O regime de escoamento tampão, ou potencial, diminuirá progressivamente de espessura, até que finalmente desaparecerá. Segue-se uma região em

que o escoamento evolui para um perfil de equilíbrio: a partir de $x/D_i \approx 3$, a velocidade na linha central começará a diminuir e o gradiente axial de velocidade é negativo. Ao longo da distância radial, a acção difusiva tende a estabilizar o perfil. As regiões em que a taxa de deformação radial de $\bar{U}$ é maior que a de equilíbrio local, são caracterizadas por transferência de quantidade de movimento por difusão turbulenta para as regiões exteriores, resultando no alargamento do jacto.

Na região inicial do jacto, onde os gradientes radiais da velocidade média axial são muito elevados, a transferência de energia cinética do campo médio para o campo turbulento é fundamentalmente condicionada pelo balanço entre as tensões de Reynolds $\overline{u'v'}$ e a taxa de deformação, $\partial \bar{U}/\partial r$. A convecção de energia cinética turbulenta, k, é aproximadamente da mesma ordem de grandeza nas direcções x e r. Mais a jusante, os gradientes radiais do campo médio diminuem, mantendo no entanto valores elevados até $x/D_i \approx 12$. Nesta região, a produção de energia cinética devida às tensões normais $\overline{v'^2}$, e em particular $\overline{u'^2}$, vão tendo uma maior importância apresentando o seu valor máximo a $x/D_i \approx 12$, onde as tensões normais são ambas máximas. A jusante de $x/D_i \approx 18$ os gradientes de k são desprezáveis sugerindo que o campo turbulento atingiu condições de equilíbrio local.

Jactos Coaxiais

Passando, agora, à análise dos jactos coaxiais sem rotação, pode observar-se que o escoamento na vizinhança do injector é constituído por dois cones potenciais separados por uma região anular de mistura e outra região de mistura entre o jacto exterior e o ar ambiente. A largura de cada cone diminui de uma forma aproximadamente linear com a distância ao injector, terminando os cones quando a região anular de mistura se encontra. O escoamento é então totalmente turbulento desenvolvendo-se para jusante até que o jacto se torne semelhante ao jacto axissimétrico livre.

A maioria dos estudos publicados (e.g., Champagne e Wygnanski, 1971; Durão e Whitelaw, 1973; Ribeiro e Whitelaw, 1975, 1980a, b) indicam um desenvolvimento mais rápido face ao jacto simples, com origem na região de mistura entre os dois jactos onde a ocorrência de libertação de vórtices demonstrou ter um papel determinante no desenvolvimento do escoamento.

Comparando os resultados do escoamento coaxial sem rotação com os obtidos para o caso do jacto simples, cujo ângulo de abertura é de 5.1°, pode concluir-se que a presença de um escoamento coaxial exterior reduz a taxa de abertura do jacto interior, observando-se velocidades axiais elevadas na linha central até $x/D_i = 35$. Na ausência de rotação, o escoamento correspondente ao jacto central pode ser identificado até $x/D_i = 11.6$, enquanto que a jusante desta zona os perfis radiais de velocidade mostram uma evolução monotónica.

A existência de um escoamento coaxial, além de afectar a velocidade média na linha central, vai afectar as tensões de Reynolds, em particular $\overline{u'^2}$, que apresenta máximos em regiões correspondentes às duas camadas de corte. O posterior desenvolvimento da distribuição de $\overline{u'^2}$ ao longo da linha central corresponde à existência de um patamar da velocidade média e posterior evolução para o regime de auto-preservação. Ao longo de toda a extensão do escoamento para a qual se efectuaram medidas, $\overline{u'^2} > \overline{v'^2}$, sugerindo uma maior contribuição dos termos associados aos elevados gradientes radiais de velocidade média, $\bar{U}$, na conservação de energia cinética turbulenta.

Em contraste com os jactos coaxiais estudados por Durão e Whitelaw (1973) e Ribeiro e Whitelaw (1980a, b), os escoamentos sem rotação aqui estudados assumem rapidamente características de uma estrutura de jacto simples, de modo que a jusante de $x/D_i = 4$ as tensões normais e de corte

evidenciam um só máximo localizado na camada de corte exterior. Os máximos de $\overline{u'^2}$ são superiores aos observados para $\overline{v'^2}$ e w'^2 (e.g., $\overline{u'^2} = 1.85\ \overline{v'^2}$), ocorrendo para valores de r inferiores quando comparados com as tensões normais das outras duas componentes. As tensões de corte normalizadas pela velocidade axial máxima, $\overline{u'v'}/U_{CL}$, mostram valores máximos inferiores a 0.010, e portanto da mesma ordem de grandeza aos medidos por Ribeiro e Whitelaw (1980a, b) e Durão et al. (1991), mas inferiores aos considerados típicos em jactos auto-perservantes (i.e., 0.020, Tennekes e Lumley, 1972). À medida que aumenta a distância à saída do injector, observa-se um decréscimo pronunciado das tensões normais associadas a valores elevados e positivos de $\partial \overline{U}/\partial x$ ao longo da camada de corte exterior.

Na região vizinha da saída do atomizador ($x/D_i = 0.6$) e na zona da camada de corte interior observa-se que $\overline{v'^2} > \overline{u'^2}$, de acordo com o verificado por Ribeiro e Whitelaw (1980a, b) para jactos coaxiais com $U_i/U_o = 1$, sendo esta zona caracterizada por um transporte radial das flutuações radiais de velocidade. Mais a jusante ($x/D_i = 3.6$), as distribuições da velocidade média axial ainda exibem uma região de gradiente radial positivo localizada entre duas regiões de gradiente oposto. As distribuições de $\overline{v'^2}$ não evidenciam grandezas tão elevadas como as encontradas na região inicial do escoamento, tomando valores sempre inferiores a $\overline{u'^2}$. Os perfis radiais das tensões de corte $\overline{u'v'}$ ainda apresentam duas alterações de sinal, o que está qualitativamente de acordo com a ocorrência de dois máximos e um mínimo nos perfis da velocidade média.

Mais a jusante ($x/D_i = 11.6$) as tensões de Reynolds mostram um comportamento idêntico, sugerindo que as camadas de mistura atingiram a linha central: os seus máximos estão localizados na região exterior a $r/D_i \approx 3.7$. Somente para $x/D_i = 31.6$ se observa um comportamento monotónico da distribuição da componente axial da velocidade média. O comportamento das tensões de corte $\overline{u'v'}$ já exibe características de um jacto completamente desenvolvido.

Jactos Coaxiais com Recirculação

O caso 3, representado na Figura 6, é caracterizado por um núcleo central em rotação sólida, em que a velocidade tangencial aumenta linearmente com o raio, e por uma zona exterior em que a evolução radial da velocidade é do tipo hipérbole equilátera. Os resultados mostram ainda uma rápida desaceleração, deformação e expansão do núcleo central do escoamento, reversão do escoamento e alterações na distribuição de velocidades e pressões. A rápida expansão do escoamento é visível logo à saída do injector.

A componente tangencial da velocidade média tem uma distribuição típica de rotação sólida na vizinhança da linha central, exibindo características semelhantes às de um vórtice livre na região exterior do escoamento ($W \alpha 1/r$), pelo que os escoamentos apresentam, em geral, uma distribuição típica de um vórtice de Rankine (e.g., Gupta et al., 1984). Este vórtice tem características instáveis associadas à transição vórtice forçado/vórtice livre, a qual se processa para valores constantes de intensidade do vórtice.

Como é conhecido, a rotação do escoamento implica o decréscimo da pressão local ao longo da linha central, o qual está associado a um valor positivo de $\partial P/\partial r$ devido à conservação radial de quantidade de movimento. À medida que o gradiente radial de pressão diminui com a distância para jusante, o papel da difusão turbulenta torna-se mais importante e o escoamento torna-se mais dependente da estrutura turbulenta. À medida que a quantidade de movimento axial e tangencial aumentam segundo a direcção radial, na região mais a jusante da saída do atomizador, todas as componentes da velocidade tendem a diminuir, originando um aumento de pressão

na linha central e, consequentemente um gradiente de pressão adverso que leva à recirculação do escoamento.

O efeito da velocidade tangencial é predominante na região inicial: de facto, a velocidade tangencial dissipa-se mais rapidamente que o excesso de velocidade axial, de modo que a uma determinada distância da saída um jacto com rotação tende a ter as mesmas características que um jacto sem rotação.

Esta configuração evidencia uma maior taxa de abertura do escoamento, que se encontra associada a uma maior taxa de mistura, tipicamente encontrada nos escoamentos com recirculação (Heitor e Moreira, 1992).

Os principais aspectos a ter em conta relativamente ao escoamento sem rotação (caso 2) incluem: i) o escoamento com rotação tem uma taxa de abertura maior, e; ii) na região inicial a distribuição da velocidade média apresenta um decaimento mais rápido. Este segundo aspecto é uma consequência directa do termo de pressão na equação de transporte de quantidade de movimento axial. Deve ser notado que o défice de pressão na linha central depende, principalmente, do comportamento radial da força centrífuga, W^2/r, pelo que na região imediatamente a jusante do atomizador, a súbita remoção do confinamento impõe uma substancial alteração ao campo de velocidade tangencial (ou seja $\partial \bar{U}/\partial x$ aumenta), estabelecendo-se um gradiente axial positivo de pressão que vai actuar como poço da velocidade média.

Na região no núcleo central, a componente axial média apresenta um patamar de reduzida dimensão. A componente tangencial da velocidade média atinge o núcleo central do escoamento logo à saída do injector, nunca apresentando gradientes radiais nulos tal como os observados por Ribeiro e Whitelaw (1980a, b). Este facto parece ser, principalmente, devido aos menores níveis de rotação utilizados por aqueles investigadores (S = 0.26).

Os resultados da Figura 6 mostram também que as tensões normais nas direcções radial e tangencial têm a mesma ordem de grandeza e um comportamento uniforme na direcção radial. Esta característica está presente nos perfis radiais para $x/D_i > 7$ sugerindo a predominância de difusão turbulenta na conservação de energia cinética turbulenta. As distribuições das tensões de corte mostram que $\overline{u'v'}$ e $\overline{u'w'}$ mudam de sinal na vizinhança onde ocorrem os máximos de $\bar{U}$ e $\bar{W}$.

A jusante da saída do injector ($x/D_i \geq 3.6$) onde o comportamento axial da velocidade média evidencia um aumento do núcleo central de $\bar{U}$, observa-se um aumento de $\overline{u'^2}$. A jusante de $x/D_i = 7.6$, $\overline{u'^2}$ e $\overline{v'^2}$ são da mesma ordem de grandeza e sempre superiores a $\overline{w'^2}$. Uma distribuição aproximadamente isotrópica pode ser observada para $x/D_i \geq 19.6$, onde não só as tensões normais são idênticas em magnitude como as tensões de corte também apresentam valores reduzidos, sendo $\overline{u'w'}$ a tensão dominante.

Enquanto que a $x/D_i = 0.6$ a velocidade máxima é encontrada na linha central e a componente tangencial é, ainda, de reduzida magnitude, a montante de $x/D_i \geq 3.6$ U_{max} é encontrada para valores de $x/D_i > 5$, na periferia do escoamento, sendo a região do núcleo central caracterizada pela presença de reversão de escoamento. A distribuição das tensões de corte apresenta um aumento de $\overline{u'v'}$ relativamente a $\overline{u'w'}$, derivado da predominância da componente axial da velocidade média.

O aumento da mistura turbulenta associado ao escoamento com recirculação típico do caso 3 atenua a distribuição da componente tangencial da velocidade, a qual evidencia um comportamento do tipo vórtice de Rankine em regiões próximas da saída do injector e da linha central. Os resultados quantificam a penetração do jacto central na zona central de recirculação de um modo muito semelhante ao verificado por Tangirala et al. (1987), sendo neste caso a extensão da penetração grandemente dependente das condições do escoamento, particularmente dos grupos adimensionais: Re_i, Re_o e

S. O ponto de estagnação a montante está localizado no interior do jacto central e depende, obviamente, do nível de rotação.

Deve ainda ficar claro que na região inicial, onde os gradientes do campo médio são mais elevados, a produção de k resulta fundamentalmente da interacção das tensões de corte com as taxas de deformação por corte e é equilibrada pela difusão e pela dissipação. Esta é a estrutura típica de camadas de mistura turbulentas, onde a interacção entre $\overline{u'v'}$ e $\partial\overline{U}/\partial r$ introduz energia na componente $\overline{u'^2}$, que depois é redistribuída para $\overline{v'^2}$ e $\overline{w'^2}$, (e.g., Tennekes e Lumley, 1972) e está de acordo com os valores mais elevados de $\overline{u'^2}$.

Por outro lado, os valores do termo de produção por tensões normais estão associados a valores de $\overline{u'v'}/k > 0.3$, sugerindo que os mecanismos de produção actuam mais rapidamente em $\overline{u'v'}$ do que em k (Harsha e Lee, 1970). Esta análise sugere que os modelos de duas equações não são adequados para descrever esta região do escoamento e uma descrição mais adequada exige a consideração das tensões turbulentas individuais.

Na vizinhança dos pontos de estagnação, o mecanismo de produção é diferente e resulta da interacção da tensão normal $\overline{u'^2}$, com o gradiente $\partial\overline{U}/\partial x$, à semelhança do que acontece na vizinhança dos pontos de estagnação a jusante de um disco (e.g., Ferrão e Heitor, 1994).

4. CONCLUSÕES

As características turbulentas dos escoamentos com e sem rotação a jusante de um atomizador laboratorial são apresentadas e discutidas para três condições distintas, nomeadamente jactos simples ($Re_i = 6.4 \times 10^3$), jactos coaxiais sem rotação ($Re_i = 6.8 \times 10^3$; $Re_o = 45.2 \times 10^3$) e jactos coaxiais com recirculação ($Re_i = 8.1 \times 10^3$; $Re_o = 27.3 \times 10^3$; $S = 2.5$).

Em relação ao jacto turbulento simples (caso 1), verificou-se que a presença de um escoamento coaxial exterior sem rotação (caso 2) reduz a taxa de abertura do jacto interior. A presença de um escoamento coaxial com rotação (caso 3), caracterizado pela formação de uma zona central de recirculação, evidencia uma maior taxa de abertura do escoamento, que se encontra associada a uma maior taxa de mistura, tipicamente encontrada nos escoamentos com recirculação. As forças centrifugas associadas ao escoamento com rotação impõem um gradiente de pressão na direcção radial, conduzindo a um aumento da taxa de abertura do escoamento. Como consequência, são observadas profundas alterações no campo de velocidades, provocando, por sua vez, a geração de turbulência e o aumento das taxas de mistura, associado à formação de uma zona de recirculação central que se prolonga até $x/D_i = 36$. O escoamento é caracterizado por uma região inicial de elevados gradientes de velocidade média, onde as tensões turbulentas são uma ordem de grandeza superiores às observadas no escoamento sem rotação. Esta região é fortemente anisotrópica na região da linha central. Os resultados quantificam os processos de mistura turbulenta em escoamentos com interesse prático em sistemas de queima e propulsão, sendo particularmente relevantes para o desenvolvimento de métodos de cálculo a usar em projecto.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi parcialmente financiado pelo Programa CIÊNCIA na forma de uma bolsa de doutoramento concedida pela JNICT. O trabalho foi ainda parcialmente financiado pelo programa Brite/Euram através do projecto "Low-Emission Combustion Technology", contracto N.º AERO-0016-C(B), e pelo projecto de cooperação internacional "Improvement of Combustion Proces-

ses by Swirling Flows and Turbulent Recirculating Flames", contracto N.º C11-CT-91-0923 da DGXII da Comissão Europeia.

Agradece-se o apoio de Jorge Coelho na elaboração e inserção das figuras no texto.

REFERÊNCIAS

Baker, R.J., Hutchinson, P., Khalil, E.E. and Whitelaw, J.H. (1975). Measurements of Three Velocity Components in a Model Furnace With and Without Combustion. 15th Symp. (Intl.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 553-559.

Carvalho, I.S (1995). Atomização de Líquidos em Escoamentos Turbulentos com e sem Recirculação. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.

Champagne, F.H. and Wygnanski, I.J. (1971). An Experimental Investigation of Coaxial Turbulent Jets, Intl. J. Heat and Mass Transfer, 14, pp. 1455-1464.

Chigier, N.A. and Chervinsky, A. (1967). Experimental Investigation of Swirl Vortex Motion in Jets. J. Appl. Mech., 34, pp. 443-451.

Crow, S.C. and Champagne, F.H. (1971). Orderly Structure in Jet Turbulence. J. Fluid Mech., 48(3), pp. 547-591.

Dodds, W.J. and Bahr, D.W. (1990). In: **Design of Modern Turbine Combustors.** A.M. Mellor (ed.), Academic Press Inc.

Durão, D. and Whitelaw, J.H. (1973). Turbulent Mixing in the Developing Reglon of Coaxial Jets. Trans. ASME, J. Fluids Engng., 95, pp. 467-473.

Durst, F., Melling, A. and Witelaw, J.H. (1981). **Principles and Practice of Laser-Döppler Anemometry.** 2nd ed., Academic Press, New York.

Ferrão, P.M. and Heitor, M.V. (1994). Turbulent mixing and Non-gradient Diffusion in Baffle Stabilized Flames. In. Turbulent Shear Flows - 9. Ed. Durst et al., Springer Verlag.

Gupta, A.K., Lilley, D.G. and Syred, N. (1984). **Swirl Flows**. Energy and Engineering Science Series, Abacus Press.

Harsha, P.I. and Lee, S.C. (1970). Correlation Between Turbulent Shear-Stress and Turbulent Kinetic Energy. AIAA J., 8, pp. 1508-1510.

Hinze, J.O. (1975). **Turbulence.** 2nd ed., McGraw-Hill Classic Textbook Reissue Series.

Kuhlman, J.M. (1987). Variation of Entrainment in Annular Jets. AIAA J., 25(3), pp. 373- 379.

Melling, A. and Whitelaw, J.H. (1975). Optical and Flow Aspects of Particles. Proceedings of the LDA Symposium, Copenhagen, pp. 382-402.

Pratte, B.D. and Keffer, J.F. (1972). The Swirling Turbulent Jet. Trans. ASME, J. Basic Engng., 94, pp. 739-748.

Rajaratnam, N. (1976). **Turbulent Jets**. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H. (1980a). Coaxial Jets With and Without Swirl. J. Fluid Mech., 96(4), pp. 769-795.

Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H. (1980b). The Structure of Turbulent Jets. Proc. R. Soc. Lond. A 370, pp. 281-301.

Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H. (1975). Statistical Characteristics of a Turbulent Jet. J. Fluid Mech., 70(1), pp. 1-15.

Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H. (1976). Turblent Mixing of Coaxial Jets With Particular Reference to the Near Exit Region. Trans. ASME J. Fluids Engng., 98, pp. 284-292.

Ricou, F.P. and Spalding, D.B. (1961). Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets. J. Fluid Mech., 11, pp. 21-32.

Tangirala, V., Chen, R. H. and Driscoll, J. F. (1987). Effect of Heat Release and Swirl on the Recirculation Within Swirl-Stabilized Flames. Combust. Sci. and Tech., 51, pp. 75-95.

Tennekes, H. and Lumley, J.L. (1972). **A First Course in Turbulence**. The MIT Press.

Winterfeld, G., Eickhoff, H.E. and Depooter, K. (1990). In: **Design of Modern Turbine Combustors.** A.M. Mellor (ed.), Academic Press Inc.

GRÁFICA MAIADOURO, S.A.

35 anos a imprimir qualidade

35

profissionais qualificados

formação técnica

equipamento necessário

controlando todos os processos de produção

estamos sempre na linha da frente

fazer grandes trabalhos em pouco tempo

Apoiamo-nos numa equipa de profissionais qualificados com a adequada experiência e formação técnica.

Possuimos todo o equipamento necessário e amplas instalações que nos permite fazer grandes trabalhos em pouco tempo.

Livros e revistas, reproduções de obras de arte, catálogos, desdobráveis e cartazes, são a nossa actividade principal.

Estamos sempre na linha da frente das Artes Gráficas em Portugal, controlando todos os processos de produção com rigor e conhecimento dos grandes mestres.

A assinatura da Gráfica Maiadouro é a melhor garantia de um trabalho perfeito.

SEDE
Rua Padre Luís Campos, 686 - VERMOIM - Ap. 1006 - 4471 MAIA Codex
Tel. (02) 944 82 45 / 84 45 - 948 88 30 / 60 04 • Fax (02) 948 77 07

DELEGAÇÃO
Avenida Elias Garcia, 162 - 2.º Esq. - 1050 LISBOA
Tel. (01) 795 53 00 - 796 92 10 • Fax (01) 796 92 79